

# **ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DE CÁLCULO DAS COBERTURAS JARDIM**

**RICARDO JORGE DA SILVA FERREIRA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

JANEIRO DE 2013

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013- Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais  
e amigos

*“Temos o destino que merecemos. O nosso destino está de acordo com os nossos méritos.”*

Albert Einstein



## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos, pelos conhecimentos transmitidos, a ajuda, a disponibilidade, a simpatia, o incentivo, a paciência e o apoio incondicional que demonstrou ao longo deste semestre para o desenvolvimento deste trabalho. Gostaria também de agradecer a proposta do tema e a sua compreensão e rápida aceitação em ser meu orientador.

Ao Engenheiro António Curado, por ter disponibilizado o modelo base, pela informação transmitida e pela possibilidade de poder contribuir no seu projeto de doutoramento.

À Sara Freitas pela sua ajuda incondicional na realização deste trabalho. A sua compreensão e disponibilidade sempre que necessitava foram essenciais para que este objetivo fosse cumprido.

À Bárbara Cruchinho, ao Filipe Fernandes, ao Francisco Rocha, ao João Pedro Macedo e ao Ricardo Teixeira, que durante este percurso universitário sempre me ajudaram e partilharam comigo momentos e sentimentos que nunca vou esquecer. Muito obrigado!

Aos meus grandes amigos Daniel Sequeira, Diogo Borges e Diogo Massena que sempre acreditaram em mim sem nunca me deixarem de apoiar e incentivar. A nossa amizade é incondicional, muitos momentos, muita cumplicidade e muitos sentimentos. Se este objetivo foi cumprido em muito se deve a vocês. Muito mas muito obrigado!

À minha namorada, Silvana Ferraz, pelo amor, carinho, compreensão e paciência que tem comigo. Obrigado por me incentivares, apoiares e motivares a conseguir realizar este objetivo.

Aos meus pais que sempre acreditaram em mim, por sempre me apoiarem em todos os momentos e me ajudarem a tomar as melhores decisões para que conseguisse chegar até aqui. Muito obrigado por tornarem isto possível e por me proporcionarem todas as condições sem nunca me negar nada para que este objetivo fosse cumprido. Muito Obrigado!

A todos os amigos que não referi mas que sempre se disponibilizam para me ajudar e apoiar em todos os momentos. A realização deste trabalho também se deve a vocês.

A todos o meu sincero agradecimento. Obrigado.



## **RESUMO**

O crescimento das cidades levou a uma perda significativa de espaços verdes. Atualmente já é dada especial atenção a este assunto e procuram-se soluções que minimizem esse efeito, como tal intensificou-se o estudo do comportamento de jardins na cobertura dos edifícios.

Uma vez que já se verifica a utilização de coberturas jardim em diversas obras, a presente dissertação surge com o objetivo de analisar quais dos parâmetros que, característicos deste tipo de coberturas, apresentam maior influência no comportamento higrotérmico de um edifício.

Neste trabalho recorreu-se ao programa EnergyPlus para estudar a influência de uma cobertura jardim no comportamento higrotérmico de uma habitação localizada na cidade do Porto. Desta forma foram realizadas diversas simulações que permitiram observar e comentar o comportamento térmico e energético de uma habitação quando se aplica o modelo cobertura jardim e se faz variar a espessura da camada de isolamento, o coeficiente de absorção solar e a exposição solar.

Realizou-se uma análise de sensibilidade, ao modelo cobertura jardim, onde se estuda a influência de parâmetros associados às plantas e ao solo que poderão ter maior influência no registo das temperaturas interiores dos edifícios.

Este estudo também permitiu definir os benefícios que a adoção deste tipo de cobertura tem nas áreas económica e ambiental e observar de que forma a implementação da cobertura jardim consegue influenciar o comportamento térmico da habitação nos meses em que as temperaturas exteriores são extremas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Coberturas Jardim, Comportamento Higrotérmico, EnergyPlus, Análise de Sensibilidade, Benefícios.





## **ABSTRACT**

The growth of cities has led to a significant loss of green spaces. Nowadays a special attention is already being given to this issue and solutions to minimize this effect are being searched, as such, the study of green roofs on buildings has increased.

Once the use of green roofs is already a common practice, the main aim of this essay is to analyze the parameters, which being characteristic of this type of roof, have a major influence on the hygrothermal behavior of a building.

In this essay the program EnergyPlus was used in order to study the influence of a green roof on the hygrothermal behavior of a building in the city of Porto, Portugal. This way, several simulations were created, which allowed observing and commenting the thermal and energetic behavior of a building when a green roof model is applied and the thickness of the isolation layer, the level of solar absorption and exposure vary.

A sensitivity index to the green roof model was made to study the influence of the parameters associated to plants and soil, which may have a bigger impact on the temperatures inside the buildings.

This dissertation has also permitted to see the benefits that this kind of roof has to the economy and the environment and observe in which way the implementation of green roofs influences the thermal behavior of a building during the months when the temperatures outside are extreme.

**KEYWORDS:** Green Roof, Hygrothermal Behaviour, EnergyPlus, Sensitivity Index, Benefits.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
 <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	1
1.3. DIVISÃO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	2
 <b>2. CARACTERIZAÇÃO DAS COBERTURAS JARDIM</b> .....	3
2.1. INTRODUÇÃO .....	3
2.2. COBERTURAS JARDIM EM PORTUGAL .....	4
2.2.1. ADEGA MAYOR .....	5
2.2.2. ESTÁDIO MUNICIPAL DE BRAGA .....	6
2.2.3. METRO DO PORTO – TRINDADE .....	7
2.2.4. ACADEMIA DE MÚSICA VILAR DO PARAÍSO .....	8
2.2.5. MORADIA UNIFAMILIAR .....	9
2.2.6. PASSEIO DOS CLÉRIGOS .....	10
2.3. TIPOS DE COBERTURA JARDIM .....	11
2.3.1. COBERTURAS EXTENSIVAS .....	11
2.3.2. COBERTURAS INTENSIVAS .....	12
2.3.3. COBERTURAS SEMI-INTENSIVAS .....	13
2.4. BENEFÍCIOS DAS COBERTURAS JARDIM .....	13
2.5. CONSTITUIÇÃO DAS COBERTURAS JARDIM .....	15
2.5.1. VEGETAÇÃO .....	16
2.5.2. SUBSTRATO .....	17
2.5.3. CAMADA FILTRANTE .....	18
2.5.4. CAMADA DRENANTE .....	18
2.5.5. CAMADA DE PROTEÇÃO .....	19
2.5.6. BARREIRA ANTI RAIZ / TELA IMPERMEABILIZANTE .....	19
2.6. DETALHES CONSTRUTIVOS .....	21
2.6.1. COBERTURA JARDIM EXTENSIVA .....	21
2.6.2. COBERTURA JARDIM INTENSIVA .....	21
2.6.3. PORMENOR DE DRENAGEM .....	22

2.6.4. PORMENOR DE ACABAMENTO EM PARAPEITO .....	22
2.6.5. PORMENOR TRANSIÇÃO DE PAVIMENTO .....	23
<b>3. MODELO DE SIMULAÇÃO DE COBERTURAS JARDIM .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1. MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO – ENERGYPLUS .....</b>	<b>25</b>
<b>3.2. MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE DO ENERGYPLUS .....</b>	<b>26</b>
3.2.1. MODELO EMPD .....	26
<b>3.3. MODELO DE COBERTURA JARDIM .....</b>	<b>27</b>
3.3.1. VISÃO GLOBAL .....	27
3.3.2. BALANÇO ENERGÉTICO DO MODELO DE COBERTURAS JARDIM .....	28
3.3.3. BALANÇO ENERGÉTICO DA CAMADA DE FOLHAGEM .....	29
3.2.3.1 FLUXO DE CALOR SENSÍVEL NA CAMADA DE FOLHAGEM .....	30
3.2.3.2 FLUXO DE CALOR LATENTE NA CAMADA DE FOLHAGEM .....	31
3.3.4. BALANÇO ENERGÉTICO DA CAMADA DE SOLO .....	31
3.2.4.1 FLUXO DE CALOR SENSÍVEL NA CAMADA DE SOLO .....	32
3.2.4.2 FLUXO DE CALOR LATENTE NA CAMADA DE SOLO .....	32
<b>3.4. ENERGYPLUS – PARÂMETROS DE CÁLCULO DE COBERTURAS JARDIM .....</b>	<b>33</b>
<b>3.5. CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA COBERTURA JARDIM .....</b>	<b>36</b>
<b>3.6. DESCRIÇÃO DO CASO EM ESTUDO .....</b>	<b>37</b>
3.6.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GERAL .....	37
3.6.2. APARTAMENTO EM ESTUDO .....	37
<b>4. RESULTADOS, COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO .....</b>	<b>39</b>
4.2.1. SIMULAÇÃO 1 .....	40
4.2.2. SIMULAÇÃO 2 .....	40
4.2.3. SIMULAÇÃO 3 .....	40
4.2.4. SIMULAÇÃO 4 .....	41
4.2.5. RESUMO DAS SIMULAÇÕES .....	41
<b>4.3. COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO GLOBAL .....</b>	<b>41</b>
4.3.1. TEMPERATURA ANUAL .....	42
4.3.2. TEMPERATURA MÉDIA ANUAL .....	43
4.3.3. HUMIDADE RELATIVA .....	44
4.3.4. TEMPERATURA JANEIRO .....	45
4.3.5. TEMPERATURA AGOSTO .....	46
<b>4.4. DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA .....</b>	<b>47</b>

4.4.1. CURVA DE FREQUÊNCIA ACUMULADA ANUAL.....	47
4.4.2. CURVA DE FREQUÊNCIA ACUMULADA MÊS DE JANEIRO .....	49
4.4.3. CURVA DE FREQUÊNCIA ACUMULADA MÊS DE AGOSTO .....	51
<b>4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>54</b>
<b>4.6. COMPARAÇÃO COM A LITERATURA .....</b>	<b>57</b>
<b>5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....</b>	<b>59</b>
5.1. INTRODUÇÃO.....	59
5.2. ÍNDICE DE SENSIBILIDADE.....	59
5.2.1. SIMULAÇÃO 3 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	62
5.2.2. SIMULAÇÃO 4 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	66
<b>5.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>70</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>73</b>
6.1. CONCLUSÕES GERAIS DO TRABALHO .....	73
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	75
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>77</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Coliseu de Roma, pormenor da arena, [3].	3
Figura 2.2 – Adega Mayor, planta, pormenor da cobertura com espelho de água e local de armazenamento do vinho sob a cobertura jardim, [4].	5
Figura 2.3 – Estádio do Braga, corte longitudinal e perspetivas da envolvente e cobertura jardim, [5, 6].	6
Figura 2.4 – Metro do Porto – Trindade, diferentes perspetivas, [8].	7
Figura 2.5 – Escola de Musica Vilar do Paraíso, projeto, envolvente e pormenor construtivo (Atelier Arquitetos Joaquim Massena).	8
Figura 2.6 – Habitação unifamiliar, entrada da habitação e pormenores das coberturas (Atelier Arquitetos Joaquim Massena).	9
Figura 2.7 – Passeio dos Clérigos, pormenores da cobertura jardim.	10
Figura 2.8 – Cobertura extensiva tipo, [10].	11
Figura 2.9 – Cobertura intensiva tipo.	12
Figura 2.10 – Cobertura semi-intensiva tipo, [12, 13].	13
Figura 2.11 – Constituição de coberturas ajardinadas, [16].	15
Figura 2.12 – Pormenor cobertura jardim extensiva, [30].	21
Figura 2.13 – Pormenor cobertura jardim intensiva, [30].	21
Figura 2.14 – Pormenor de um sistema de drenagem numa cobertura jardim, [30].	22
Figura 2.15 – Pormenor de um acabamento em parapeito, [30].	22
Figura 2.16 – Pormenor de transição de pavimento para cobertura jardim, [30].	23
Figura 3.1 – Modelo de funcionamento EMPD, [33].	25
Figura 3.2 – Balanço energético para uma cobertura jardim, adaptado de [34].	28
Figura 3.3 – Balanço energético para uma cobertura jardim, incluindo o fluxo de calor latente (L), fluxo de calor sensível (H), radiação de onda curta ( $I_{s\downarrow}$ ) e entrada de radiação de onda longa ( $I_{lr\downarrow}$ ). A condução para o solo e as complexas trocas de radiação de onda longa (LW) dentro da copa são também evidenciadas, adaptado de [34].	29
Figura 3.4 – Grupo Material:RoofVegetation.	33
Figura 3.5 – Vista aérea do bairro de Lordelo, bloco 14, [7].	37
Figura 3.6 – Identificação das zonas da habitação T3.	38
Figura 4.1 – Temperatura Anual Zona 1 – Quarto 1	42
Figura 4.2 – Temperatura Média Anual Zona 1 – Quarto 1	43
Figura 4.3 – Humidade Relativa Anual Zona 1 – Quarto 1	44
Figura 4.4 – Temperatura Zona 1 – Quarto 1 no mês de Janeiro	45

Figura 4.5 – Temperatura Zona 1 – Quarto 1 no mês de Agosto .....	46
Figura 4.6 – Frequência acumulada anual para o Quarto 1.....	47
Figura 4.7 – Frequência acumulada anual para o Quarto 3.....	48
Figura 4.8 – Frequência acumulada no mês de Janeiro para o Quarto 1.....	49
Figura 4.9 – Frequência acumulada no mês de Janeiro para o Quarto 3.....	50
Figura 4.10 – Frequência acumulada no mês de Agosto para o Quarto 1 .....	51
Figura 4.11 – Frequência acumulada no mês de Agosto para o Quarto 3 .....	52
Figura 5.1 – Índice de sensibilidade dos parâmetros da Simulação 3.....	62
Figura 5.2 – Índice de sensibilidade dos parâmetros da Simulação 4.....	66



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipos de Coberturas jardim com as respectivas características, adaptado de [1].	14
Tabela 2.2 – Camadas que constituem as coberturas jardim.	15
Tabela 2.3 – Exemplo de plantas tipo para cada cobertura, [19, 20, 21, 22].	16
Tabela 2.4 – Altura do substrato conforme o tipo de vegetação, [17]	17
Tabela 2.5 – Exemplos de geotexteis utilizados nas coberturas jardim, [23, 24].	18
Tabela 2.6 – Exemplos materiais constituintes da camada drenante, [25, 26].	19
Tabela 2.7 – Materiais constituintes da barreira anti raiz / tela impermeabilizante, [27, 28, 29].	20
Tabela 3.1 – Descrição dos parâmetros de cálculo de coberturas jardim, [34].	34
Tabela 3.2 – Valores de referência e intervalo de valores dos parâmetros de cálculo de coberturas jardim.	35
Tabela 3.3 – Instrumento de medição dos parâmetros das plantas.	36
Tabela 3.4 – Identificação das zonas, orientação e área de cada compartimento.	38
Tabela 4.1 – Cenário geral da Simulação 2	40
Tabela 4.2 – Resumo das simulações	41
Tabela 4.3 – Características do compartimento utilizado nas simulações.	41
Tabela 4.4 – Características dos Quartos 1 e 3 utilizada nas simulações.	47
Tabela 4.5 – Valores de referência da curva de frequência acumulada para o Quarto 1.	53
Tabela 4.6 – Valores de referência da curva de frequência acumulada para o Quarto 3.	53
Tabela 4.7 – Resultados das frequências acumuladas da Simulação 1A para Quarto 1	56
Tabela 4.8 – Resultado das frequências acumuladas para Quarto 1	57
Tabela 5.1 – Parâmetros de caracterização das plantas.	59
Tabela 5.2 – Parâmetros de caracterização do solo.	60
Tabela 5.3 – Intervalo de valores e valores de referência dos parâmetros.	61
Tabela 5.4 – Parâmetros mais relevantes na escolha da vegetação.	65
Tabela 5.5 – Parâmetros mais relevantes na escolha do solo.	65
Tabela 5.6 – Influência dos parâmetros nas temperaturas mínimas, médias e máximas.	66
Tabela 5.7 – Parâmetros mais relevantes na escolha da vegetação.	69
Tabela 5.8 – Parâmetros mais relevantes na escolha do substrato de solo.	69
Tabela 5.9 – Influência dos parâmetros nas temperaturas mínimas, médias e máximas.	70



## ABREVIATURAS

BLAST – Building Loads Analysis and System Thermodynamics

CTF – Conduction Transfer Function

DOE – The Department of Energy

EMPD – Effective Moisture Penetration Depth

EPW – Ficheiro climático utilizado pelo EnergyPlus

FASST – Fast All-season Soil STrength

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

HAMT – Combined Heat and Moisture Transfer

IGRA – Internacional Green Roof Association

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios

TMY – Typical Meteorological Year

## SÍMBOLOS

$C_e^g$  – coeficiente de transferência de calor latente na camada de solo

$C_f$  – coeficiente de transferência de calor

$C_h^g$  – coeficiente de transferência de calor sensível na camada de solo

$C_{hn}^f$  – coeficiente de transferência das condições de estabilidade atmosférica na folhagem

$C_{hn}^g$  – coeficiente de transferência das condições de estabilidade atmosférica no solo

$C_{pa}$  – calor específico do ar a pressão constante [1005.6 J/kg]

$F_f$  – balanço energético da camada de folhagem [W/m<sup>2</sup>]

$F_g$  – balanço energético da camada de solo [W/m<sup>2</sup>]

$H_f$  – fluxo de calor sensível na camada de folhagem [W/m<sup>2</sup>]

$H_g$  – fluxo de calor sensível na camada de solo [W/m<sup>2</sup>]

$I_s^\downarrow$  – totalidade da radiação de onda curta de entrada [W/m<sup>2</sup>]

$I_{ir}^\downarrow$  – totalidade da radiação de onda longa [W/m<sup>2</sup>]

$K_v$  – constant de von Karmen [0.4]

$l_f$  – calor latent de vaporização da temperatura de folhagem [J/kg]

$l_g$  – calor latent de vaporização na superfície do solo [J/kg]

$L_f$  – fluxo de calor latente na camada de folhagem [W/m<sup>2</sup>]

$L_g$  – fluxo de calor latente na camada de solo [W/m<sup>2</sup>]

LAI – índice de área foliar [m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]

$q_a$  – coeficiente de homogeneização do ar

$q_g$  – coeficiente de homogeneização da superfície do solo  
 $q_{af}$  – coeficiente de homogeneização do ar dentro da copa  
 $q_{f,sat}$  – relação do coeficiente de homogeneização saturado à temperatura da folhagem  
 $q_{g,sat}$  – relação do coeficiente de homogeneização saturado à temperatura do solo  
 $r_a$  – resistência aerodinâmica à transpiração [s/m]  
 $r_s$  – resistência estomática da folha [s/m]  
 $r_{s,min}$  – resistência estomática mínima da folha [s/m]  
 $r''$  – fator de humidade da superfície da folha  
 $T_{af}$  – temperatura do ar dentro da copa [Kelvin]  
 $T_f$  – temperatura da folhagem [Kelvin]  
 $T_g$  – temperatura do solo [Kelvin]  
 $W$  – velocidade do vento acima da copa [m/s]  
 $W_{af}$  – velocidade do vento dentro da folhagem [m/s]  
 $z$  – espessura da camada de solo [m]  
 $Z_a$  – altura do instrumento nas condições de estabilidade atmosférica [m]  
 $Z_d$  – altura acima do solo em que a velocidade do vento é zero [m]  
 $Z_{o,f}$  – rugosidade da folhagem na escala de comprimento [m]

## CARACTERES GREGOS

$\alpha_f$  – albedo da copa  
 $\alpha_g$  – albedo da superfície do solo  
 $\varepsilon_f$  – emissividade da copa  
 $\varepsilon_g$  – emissividade da superfície do solo  
 $\varepsilon_1$  – relação entre emissividade da copa e do solo  
 $\rho_{af}$  – massa volúmica do ar na temperatura de folhagem [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_{ag}$  – massa volúmica do ar na superfície do solo [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\theta$  – teor de humidade  
 $\sigma$  – constante de Stefan-Boltzmann [ $5.67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]  
 $\sigma_f$  – fração da cobertura de vegetação





# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

Atualmente há uma preocupação crescente com a diminuição dos espaços verdes nas cidades que retiram qualidade de vida às populações. Uma forma de minimizar este problema, que nos afeta a todos, foi a introdução de coberturas jardim na cobertura dos edifícios.

Com a introdução deste tipo de coberturas surgiu a necessidade de tornar esta solução útil aos utentes dos edifícios no que diz respeito a funcionalidade, aproveitamento e comportamento higrotérmico. As respostas a estas questões já têm vindo a ser objeto de estudo e, cada vez mais se verifica que os benefícios que se podem obter são consideráveis a nível económico e ambiental.

Para estudar o comportamento higrotérmico de um edifício existem diversas ferramentas computacionais. Para o desenvolvimento desta dissertação recorreu-se ao programa EnergyPlus que permite simular o comportamento de um edifício, quando neste se implementa um modelo cobertura jardim.

Na primeira fase deste trabalho pretende-se introduzir o tema de coberturas jardim mostrando como se caracterizam, como são constituídos e que vantagens / desvantagens apresentam, assim como os benefícios que lhes estão associados.

Numa segunda fase criou-se o modelo de situação aplicável numa habitação com o objetivo de demonstrar / quantificar os benefícios térmicos provocados no interior dos edifícios.

### 1.2. OBJETIVOS

O trabalho desenvolvido nesta dissertação tem como objetivo a análise de sensibilidade dos parâmetros de cálculo das coberturas jardim, utilizando o software EnergyPlus como ferramenta principal.

De forma a alcançar esse objetivo, foi necessário desenvolver objetivos parciais para uma melhor organização e compreensão:

- Caracterização das coberturas jardim;
- Aplicação do programa EnergyPlus à simulação higrotérmica de uma cobertura jardim;
- Análise de sensibilidade do comportamento interior de uma habitação face aos parâmetros de cálculo das coberturas jardim.

### **1.3. DIVISÃO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

A presente dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos.

No Capítulo 1 apresenta-se um enquadramento do tema do trabalho realizado, definem-se os objetivos e indica-se a forma como este trabalho foi organizado.

O Capítulo 2 tem como objetivo fazer a caracterização das coberturas jardim. Inicialmente é apresentada uma breve referência histórica e o contexto da importância atual deste conceito. Este capítulo define o conceito de cobertura jardim e como este tipo de cobertura pode ser classificada. Apresentam-se as vantagens / desvantagens deste sistema construtivo assim como os seus benefícios. Descrevem-se as camadas que constituem este tipo de cobertura e apresentam-se alguns pormenores construtivos associados às coberturas jardim.

No Capítulo 3 são expostos os conceitos necessários à compreensão de todo o trabalho desenvolvido, nomeadamente no que diz respeito ao modelo de simulação de coberturas jardim. Apresentam-se as características e os modelos de transferência de calor e humidade do programa de simulação Energy-Plus e descreve-se toda a metodologia seguida pelo programa na quantificação dos processos de cálculo da temperatura e humidade relativa interior provocados pela implementação de uma cobertura jardim. São também apresentados os parâmetros de cálculo associados às coberturas jardim que o programa utiliza na quantificação desses processos. Neste capítulo faz-se também a descrição do caso em estudo através da sua localização e caracterização geral.

O Capítulo 4 tem como objetivo apresentar os resultados e a discussão dos mesmos. Neste capítulo são descritas as condições e cenários de simulação realizados. Além de se apresentarem os resultados das simulações faz-se também uma comparação dos resultados obtidos com a literatura existente sobre os saldos térmicos que este tipo de cobertura pode proporcionar nos edifícios.

No Capítulo 5 apresentam-se os resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros de cálculo das coberturas jardim, objetivo principal desta dissertação. A análise foi realizada tendo em conta as simulações que contam com efeito das coberturas jardim, e definindo-se os parâmetros que mais influência têm no comportamento higrotérmico das coberturas jardim.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões gerais do trabalho desenvolvido e propõe alguns desenvolvimentos futuros relacionados com o tema.



## 2

## CARACTERIZAÇÃO DAS COBERTURAS JARDIM

### 2.1. INTRODUÇÃO

Com a revolução industrial do século XIX deu-se um deslocamento das massas populacionais do meio rural para as cidades. Por consequência deste movimento o crescimento nas cidades aconteceu sem que houvesse organização e equilíbrio nos planos urbanísticos.

Esta falta de cuidado nos planos urbanísticos levou a que depressa começassem a aparecer problemas de saúde, sociais, ambientais, de ocupação de solo, entre outros. Estes desequilíbrios levaram Ebenezer Howard em 1898 e Patrick Abercrombie em 1944 (Dunnet & Kingsbury, 2004) a proporem o conceito de Cidade-Jardim [1].

Os primeiros registos desta tecnologia remontam ao século VI a.C. nas antigas civilizações dos rios Tigre e Eufrates (Mesopotâmia) através dos jardins suspensos da Babilónia, em que era bombeada água do rio para irrigação das plantas [2].

Entre 70 e 90 d.C. foi construído o Coliseu de Roma. Nesta construção denota-se já o aproveitamento do espaço como necessidade de organização da cidade o que levou a que se comesasse a utilizar as coberturas como espaços funcionais. Esta era utilizada como arena por baixo da qual existiam as prisões de gladiadores e animais (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Coliseu de Roma, pormenor da arena, [3].

No entanto, este sistema construtivo das coberturas jardim só com o desenvolvimento de novas técnicas foi sendo cada vez mais adotado nas cidades pelos arquitetos, adaptando-os a espaços verdes que à sua utilidade lúdica / funcional acrescentou uma melhor qualidade ambiental, visual e conforto.

Atualmente as coberturas jardim são uma área técnica em expansão. Começam a existir cada vez mais empresas a investir no desenvolvimento destas soluções, criando-se um novo ramo industrial organizado e economicamente forte [1].

Os estudos até agora efetuados provam que existem inúmeras vantagens na sua utilização, prova disso é o que alguns governos já implementaram nos seus países, estabelecendo incentivos fiscais a quem adotar este tipo de solução construtiva, como exemplo refere-se a Alemanha em que 43% das suas cidades já adotaram estes incentivos [1].

## **2.2. COBERTURAS JARDIM EM PORTUGAL**

Em Portugal a importância do conceito de coberturas jardim é já bastante relevante na conceção de obras públicas e privadas. Arquitetos como Siza Vieira, Souto Moura, Joaquim Massena entre outros já há alguns anos que têm vindo a adotar em alguns dos seus projetos este tipo de solução.

Uma das primeiras e mais conhecidas obras realizadas no nosso país foi a Fundação Calouste Gulbenkian, construída em 1956, em que os jardins projetados pelos arquitetos paisagistas Gonçalo Ribeiro Telles e António Viana Barreto envolvem a cobertura do estacionamento subterrâneo assim como algumas áreas do edifício.

Existem obras mais recentes, umas já concluídas e outras ainda em fase de construção ou projeto. Serão aqui referidas algumas obras projetadas por arquitetos de renome no nosso país que adotaram este tipo de solução construtiva:

- Adega Mayor (Alentejo), arquiteto Siza Vieira;
- Estádio Municipal de Braga (Braga), arquiteto Souto Moura;
- Metro do Porto – Trindade (Porto), arquiteto Souto Moura;
- Academia de Musica Vilar do Paraíso (Vila Nova de Gaia), arquitetos Joaquim Massena;
- Moradia em Unifamiliar (Vila Nova de Gaia); arquitetos Joaquim Massena;
- Passeio dos Clérigos (Porto), arquiteto Pedro Balonas;

### 2.2.1. ADEGA MAYOR

A Adega Mayor, construída em 2007, é uma estrutura que exigiu grande espaço, volumetria e condições específicas. Teve no seu projeto / execução a aplicação do conceito de cobertura jardim com espelho de água, minimizando assim o impacto paisagístico na região onde se localiza (Portalegre - Alentejo). Construída da superfície para o subsolo procurando um enquadramento ambiental e estético ao qual se associou a especificidade de ambiente térmico interno necessário à feitura e conservação do vinho, numa região climática de grandes amplitudes térmicas, qualidades atingíveis no seu conjunto com a solução da cobertura adotada nesta estrutura (Figura 2.2).

Palavras-chave: Adega, cobertura jardim, enquadramento ambiental, ambiente térmico.



Figura 2.2 – Adega Mayor, planta, pormenor da cobertura com espelho de água e local de armazenamento do vinho sob a cobertura jardim, [4].

### 2.2.2. ESTÁDIO MUNICIPAL DE BRAGA

O Estádio Municipal de Braga, designado por “A pedreira”, encontra-se inserido numa encosta rochosa, é uma obra de arte de referência no nosso país e premiada internacionalmente pelo seu carácter inovador, beleza e enquadramento paisagístico.

Neste estádio devido à falta de espaço na sua envolvente, o relvado desportivo está instalado sobre a cobertura de um parque de estacionamento automóvel que lhe está subjacente, criando-se assim a solução que compatibiliza a sua função desportiva com a existência de espaço necessário à receção de espectadores, sem perturbação da área ambiental que o rodeia (Figura 2.3).

Palavras-chave: Enquadramento paisagístico, relvado desportivo, cobertura.

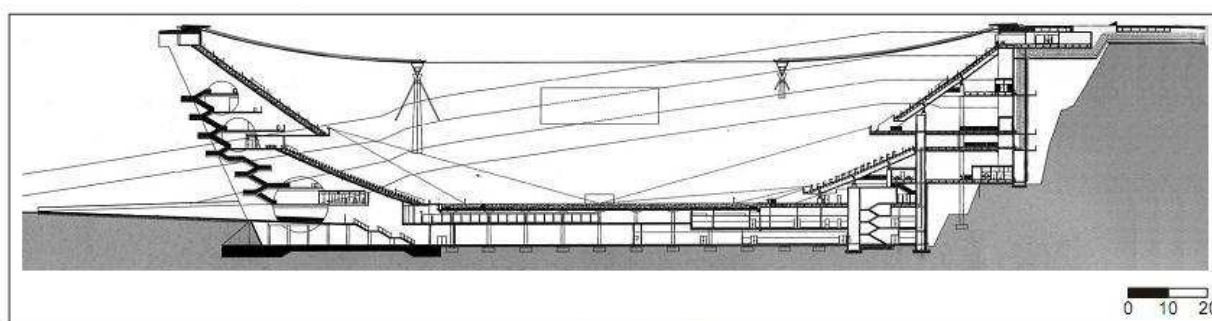


Figura 2.3 – Estádio do Braga, corte longitudinal e perspetivas da envolvente e cobertura jardim, [5, 6].



### 2.2.3. METRO DO PORTO – TRINDADE

Na estação da Trindade, central quer na cidade quer na rede do Metro do Porto, a adoção do conceito de cobertura jardim conseguiu, além do isolamento acústico e recuperação ambiental da zona envolvente de inclinação acentuada com edifícios altos dominantes criar a sensação de espaço suscetível de definir uma nova praça pública (Figura 2.4).

Palavras-chave: Cobertura jardim, isolamento acústico, recuperação ambiental;

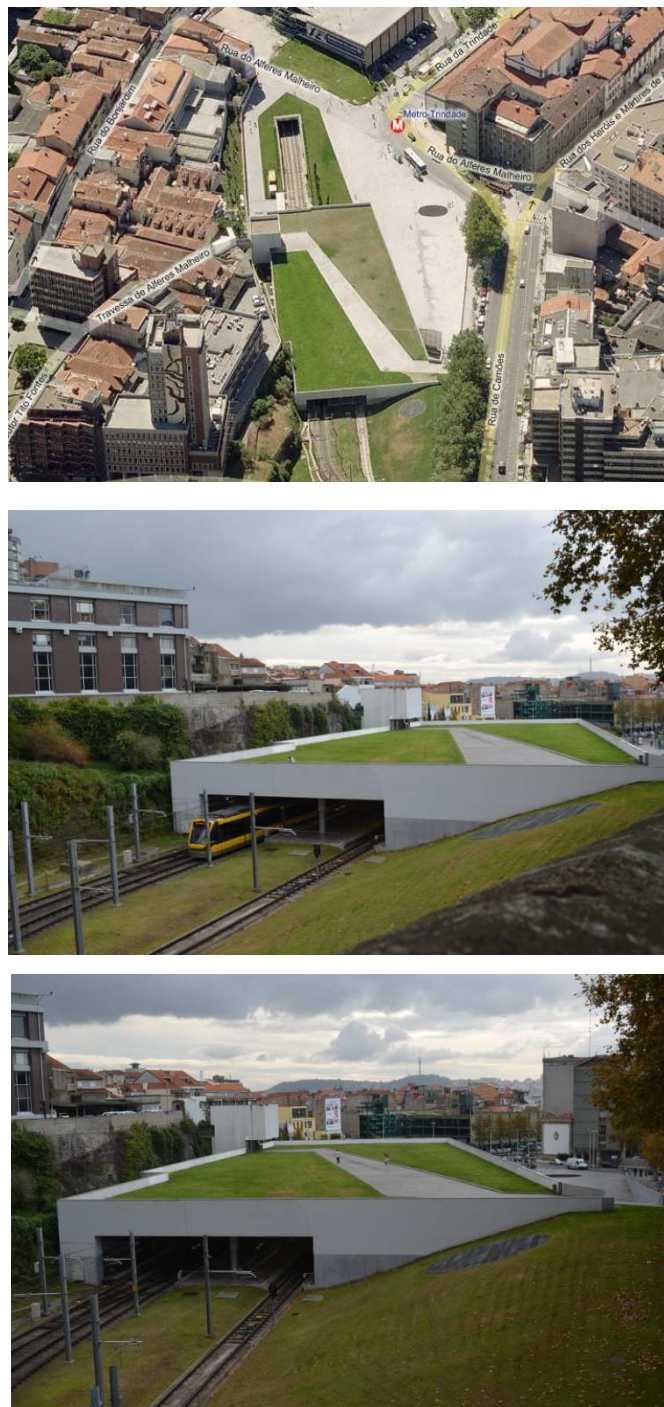


Figura 2.4 – Metro do Porto – Trindade, diferentes perspetivas, [8].

#### 2.2.4. ACADEMIA DE MÚSICA VILAR DO PARAÍSO

A Academia de Musica de Vilar do Paraíso foi projetada com uma vertente de escola jardim, tendo em todas as coberturas implementados jardins. Devido à sua grande área de construção foi adotada esta solução de modo a atenuar o impacto da volumetria dos edifícios na área envolvente e a obter um melhor enquadramento e equilíbrio paisagísticos. Nesta escola de música a cobertura possibilita uma redução do ruído externo e permite melhores ganhos térmicos no interior dos edifícios (Figura 2.5).

Palavras-chave: Escola jardim, cobertura jardim, equilíbrio paisagístico.



Figura 2.5 – Escola de Musica Vilar do Paraíso, projeto, envolvente e pormenor construtivo (Atelier Arquitetos Joaquim Massena).

### 2.2.5. MORADIA UNIFAMILIAR

Esta moradia unifamiliar, construída em 1992, é composta por três pisos, R/C, 1º andar e garagem à cota inferior do R/C.

Foi implementada a cobertura jardim no piso superior e nas traseiras da casa onde parcialmente é cobertura da garagem. Aqui pode-se observar que esta solução foi pensada não só para conferir isolamento térmico mas ainda permitir a funcionalidade destas áreas como espaços de lazer; contribuindo também para uma melhor harmonização ambiental (Figura 2.6).

Palavras-chave: Moradia Unifamiliar, cobertura jardim, isolamento térmico, espaços de lazer, harmonização ambiental.



Figura 2.6 – Habitação unifamiliar, entrada da habitação e pormenores das coberturas (Atelier Arquitetos Joaquim Massena).



### 2.2.6. PASSEIO DOS CLÉRIGOS

O passeio dos Clérigos, outrora um terreno arborizado, sofreu várias transformações com o desenvolvimento da cidade que o descaracterizou e ao espaço envolvente. Com a adoção de cobertura jardim, através da implantação de oliveiras centenárias, foi possível conciliar a sua atividade comercial e turística com a valorização do espaço e património envolvente (Figura 2.7).

Palavras-chave: Cobertura jardim, oliveiras centenárias, valorização do espaço, património.



Figura 2.7 – Passeio dos Clérigos, pormenores da cobertura jardim.



## 2.3. TIPOS DE COBERTURA JARDIM

Define-se cobertura jardim como sendo uma cobertura de um edifício total ou parcialmente coberta por vegetação, uma camada de crescimento (substrato) e uma membrana de impermeabilização. Também se podem introduzir camadas adicionais, tais como uma barreira anti raiz, uma camada de drenagem e um sistema de irrigação caso o clima obrigue à sua utilização, [8].

Este tipo de coberturas não só é possível ser implementado em edifícios a construir, ainda em fase de projeto, como também pode ser aplicado em edifícios já construídos.

De acordo com a IGRA (International Green Roof Association) [9] as coberturas ajardinadas podem ser de três tipos:

- Coberturas Extensivas;
- Coberturas Semi-intensivas;
- Coberturas Intensivas;

### 2.3.1. COBERTURAS EXTENSIVAS

As coberturas extensivas não são visitáveis, isto é, não permitem a circulação e o uso desta área verde para uso das pessoas, caracterizam-se pela sua capacidade de reduzir os custos de manutenção ao mínimo através da vegetação típica deste tipo de cobertura. São cada vez mais frequentes em projetos de modernização devido ao seu relativo baixo custo de execução (Figura 2.8), [2].



Figura 2.8 – Cobertura extensiva tipo, [10].

Algumas das vantagens deste tipo de cobertura são [2], [11]:

- Peso reduzido quando comparado com o tipo de cobertura intensivo, não havendo necessidade de reforçar a estrutura dos edifícios;
- Indicados para grandes áreas e coberturas com inclinação;
- Reduzida manutenção e elevado tempo de vida;
- Normalmente não é necessária a implementação de sistemas de irrigação e sistemas de drenagem específicos;
- A vegetação utilizada pode crescer espontaneamente sem intervenção humana conferindo-lhe a ideia de um ambiente mais natural;

Apesar de apresentar muitas vantagens também se encontram algumas desvantagens no uso deste tipo de cobertura jardim sendo elas:

- Escolha limitada de plantas;
- Falta de acesso para utilizadores e atividades recreativas;
- Menor isolamento térmico e menor capacidade de retenção de água no seu substrato;

### 2.3.2. COBERTURAS INTENSIVAS

As coberturas intensivas, ao contrário do que se referiu no caso anterior, podem ser visitáveis pelas pessoas e servem de áreas de acesso e recreativas. Este tipo de cobertura caracteriza-se pela implementação de vegetação com elevado porte traduzindo-se assim num sistema mais complexo e com maiores exigências no âmbito de execução e manutenção (Figura2.9), [2].

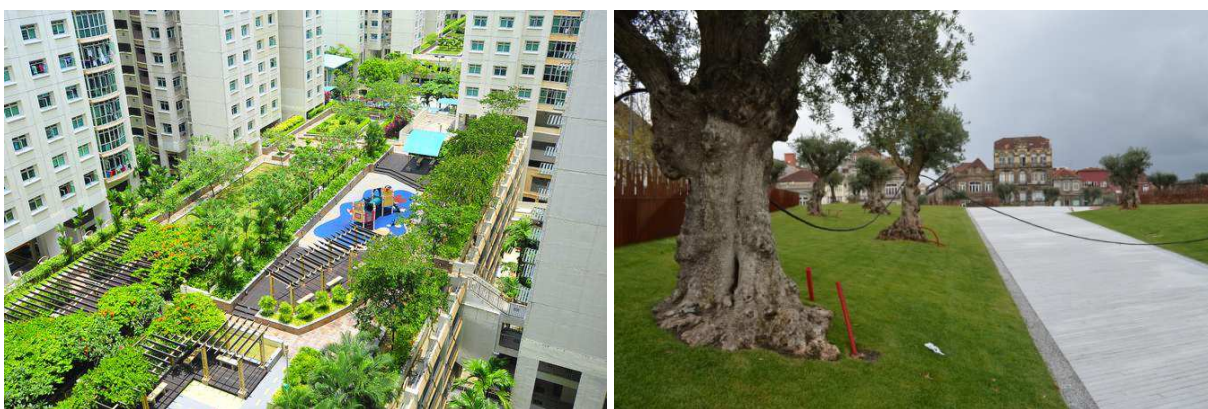


Figura 2.9 – Cobertura intensiva tipo.

Apresentam-se as seguintes vantagens no uso deste tipo de solução [2], [11]:

- Maior diversidade de plantas levando a uma maior diversidade de habitats;
- Boas propriedades de isolamento tanto a nível térmico como acústico;
- Acessibilidade das pessoas, traduzindo-se numa área funcional onde se podem desenvolver atividades lúdicas e até a prática da agricultura;
- Maior capacidade de retenção da água das chuvas devido à sua espessa camada de substrato;

Como desvantagens no uso de coberturas intensivas podemos destacar as seguintes [2], [11]:

- Maiores custos de execução e de manutenção;
- Elevadas cargas que são transmitidas à estrutura dos edifícios o que pode levar à necessidade de reforço do sistema estrutural;
- Necessidade de implementar sistemas de irrigação e drenagem que por consequência aumentam os consumos de energia, água e materiais;

### 2.3.3. COBERTURAS SEMI-INTENSIVAS

As coberturas semi-intensivas são uma conjugação dos dois tipos de coberturas jardim que foram atrás referenciados. A opção por este tipo de cobertura permite que seja uma área visitável e funcional assim como a possibilidade de utilização de qualquer tipo de vegetação (Figura 2.10) [2].



Figura 2.10 – Cobertura semi-intensiva tipo, [12, 13].

Neste tipo de cobertura como é feita a junção das coberturas extensivas e intensivas facilmente se constata que a diversidade de vegetação favorece o enquadramento ambiental, estético e utilitário. Apesar de ter maiores custos de execução e manutenção, este é compensado com melhores desempenhos térmicos e acústicos.

### 2.4. BENEFÍCIOS DAS COBERTURAS JARDIM

As coberturas jardim apresentam-se como soluções construtivas capazes de proporcionar benefícios nas áreas de conforto e estética, ambiental e económica. Apresentam-se em seguida alguns dos vários benefícios deste tipo de cobertura [11], [14], [15]:

- Contribuição para um equilíbrio do sistema urbano;
- Impacto positivo nas condições ambientais, na qualidade da paisagem citadina, na qualidade de vida das populações e no desenvolvimento económico (principalmente na produção de plantas);
- Criação de habitats para plantas, pássaros e insetos promovendo a biodiversidade;
- Absorção e retenção de algum volume das águas pluviais minimizando algumas consequências negativas de escorrência destas águas, tais como inundações, e funcionam também como filtros de poluentes devolvendo-as com melhor qualidade aos sistemas de águas pluviais;
- Redução dos poluentes atmosféricos através da vegetação que filtra e absorve poluentes e poeiras;
- Redução do efeito ilha de calor das cidades;
- Tem a capacidade de funcionar como isolamento térmico / acústico e reduzir os problemas de ruído das cidades;
- Prolongam o tempo de vida dos materiais isolantes protegendo-os dos raios solares, controlando a temperatura e reduzindo as amplitudes térmicas;

- Aumento de eficiência energética muito significativo, diminuem a ação térmica dos raios solares incidentes nas coberturas;
- Redução da necessidade de isolamento levando assim a uma redução direta nos custos de construção;

Em seguida apresenta-se uma tabela resumo das características que foram enunciadas para cada tipo de cobertura jardim (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Tipos de Coberturas jardim com as respectivas características, adaptado de [1].

	<b>Extensivas</b>	<b>Semi-intensivas</b>	<b>Intensivas</b>
<b>Uso</b>	Ecológicas (não utilizáveis)	Jardim	Jardim / Parque
<b>Tipo de vegetação</b>	Musgos / herbáceas / gramíneas	Herbáceas / gramíneas / arbustos	Relvado / perenes / arbustos / árvores
<b>Benefícios</b>	Reserva de água / maior eficiência térmica / maior biodiversidade	Reserva de água / maior eficiência térmica / maior biodiversidade / uso	Reserva de água / maior eficiência térmica / maior biodiversidade / uso
<b>Altura do Substrato</b>	60-200 mm	120-250 mm	150-400 mm
<b>Peso (saturado)</b>	80-150 kg/m <sup>2</sup>	120-200 kg/m <sup>2</sup>	180-500 kg/m <sup>2</sup>
<b>Tipo de manutenção</b>	Inexistência / baixa	Periódica	Elevada
<b>Necessidade de água</b>	Não / sim	Não / sim	Sim



## 2.5. CONSTITUIÇÃO DAS COBERTURAS JARDIM

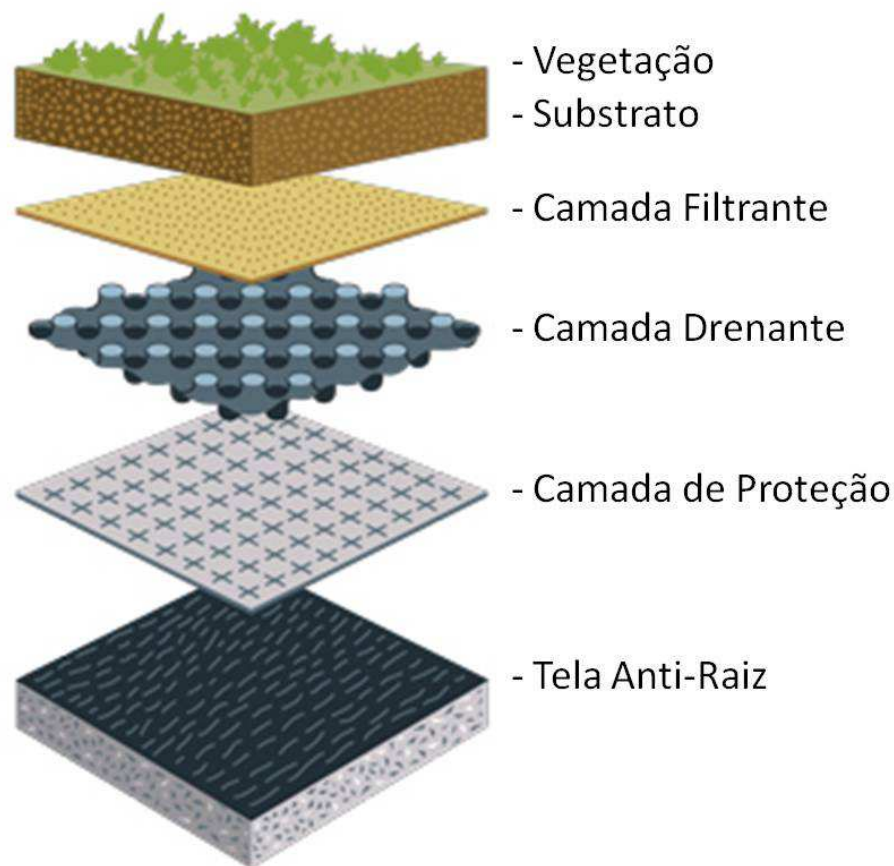


Figura 2.11 – Constituição de coberturas ajardinadas [16].

A constituição de uma cobertura jardim é definida por várias camadas que são colocadas por cima da estrutura da cobertura já existente e pela ordem da Figura 2.11.

As camadas que dão forma às coberturas jardim estão expostas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Camadas que constituem as coberturas jardim.

Constituição das Coberturas Jardim	
	Vegetação
	Substrato
	Camada Filtrante
	Camada Drenante
	Camada de Proteção
	Tela anti-Raiz

### 2.5.1. VEGETAÇÃO

A vegetação apresenta-se como o elemento fundamental deste sistema construtivo. A escolha deste elemento é de grande importância face aos comportamentos higrotérmicos e ganhos energéticos que pretendemos obter.

Esta escolha depende de vários fatores tais como [17], [18]:

- Tipo de cobertura que se pretende implementar (extensiva, semi-intensiva ou intensiva);
- O país, região e o clima onde se quer utilizar esta tecnologia;
- As normas de cada país na seleção das espécies de plantas;
- Inclinação das coberturas;
- Espessura do substrato;

A Tabela 2.3 exemplifica a vegetação consoante o tipo de cobertura que se pretenda implementar.

Tabela 2.3 – Exemplo de plantas tipo para cada cobertura, [19, 20, 21, 22].

	Extensivo	Semi-intensivo	Intensivo
<b>Seduns</b>			
<b>Plantas herbáceas</b>			
<b>Relvas</b>			
<b>Arbustos</b>			
<b>Relvados</b>			
<b>Árvores</b>			

## 2.5.2. SUBSTRATO

O substrato é dos parâmetros mais importantes numa cobertura jardim, é a base de crescimento, desenvolvimento e sustentação das plantas. Esta camada deve ter a capacidade de absorção e retenção de água assim como permitir a fácil fixação das raízes na terra vegetal.

Aspetos que se devem ter em conta na escolha deste parâmetro [17], [18]:

- Quantidade de material orgânico;
- Permeabilidade à água;
- Capacidade de retenção da água (porosidade);
- Resistência aos agentes erosivos climáticos: pluviosidade, temperatura, humidade do ar, ventos, amplitudes térmicas etc.;

A altura do substrato é relativamente importante porque dependendo do tipo de cobertura jardim que se pretenda implementar (extensivo, semi-intensivo e intensivo), a escolha de vegetação também estará diretamente ligada à espessura do substrato. Devido à carga que esta camada pode transmitir aos elementos estruturais dos edifícios, existem valores limites que não põem em risco a segurança da estrutura (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Altura do substrato conforme o tipo de vegetação, [17].

		Altura do substrato [cm]																						
		4	6	8	10	12	15	18	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	125	150	200	
Tipos de coberturas jardim e de plantas	Extensivo	Musgos-seduns	4	8																				
		Seduns-musgos-plantas herbáceas		6	10																			
		Seduns-plantas heráceas-relvas				10	15																	
		Relvas-plantas herbáceas					15	20																
	Semi-Intensivo	Relvas-plantas herbáceas				12				35														
		Arbustos selvagens				12					50													
		Arbustos					15					50												
		Arbustos grandes e densos							20											100				
	Intensivo	Relvados					15				35													
		Arbustos rasteiros					15					50												
		Arbustos de tamanho médio							20				50											
		Arbustos altos									35				70									
		Arbustos grandes e árvores pequenas													50					125				
		Árvores de porte médio																		100			200	
		Árvores de grande porte																				150	200	

### 2.5.3. CAMADA FILTRANTE

A camada filtrante tem como objetivo fundamental filtrar a água, reter as partículas finas e os nutrientes da terra vegetal; os materiais habitualmente mais usados são os geotêxteis não tecidos (Tabela 2.5). O incorreto funcionamento desta camada leva à constituição de depósito das partículas sólidas finas na camada drenante, pondo em risco a sua eficaz drenagem e aumentando o risco de saturação do substrato.

Para que a função desta camada seja corretamente desempenhada é necessário que os materiais utilizados tenham as seguintes propriedades [17], [18]:

- Elevada permeabilidade à passagem da água;
- Resistência a ações mecânicas, especialmente ao punçoamento e ao rasgamento;
- Substancialmente inalteráveis face às características da terra vegetal subjacente;

Tabela 2.5 – Exemplos de geotexteis utilizados nas coberturas jardim, [23, 24].

Geotêxtil não tecido	Geocomposito drenante
	

### 2.5.4. CAMADA DRENANTE

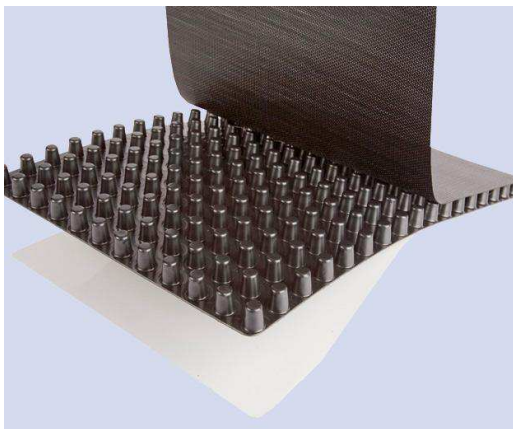
A principal função desta camada é permitir o escoamento da água em excesso para os drenos ou dispositivos de evacuação instalados o mais facilmente possível. Entre os materiais a serem utilizados, faz-se a distinção entre dois grupos, os que tem capacidade de armazenamento de água e aqueles que não disponham dessa característica (Tabela 2.6), [18].

Relativamente à possibilidade de retenção de água os materiais a serem utilizados são os granulados de argila expandida, de xisto expandido ou de pozolanas, placas de cerâmica nervuradas e telas de polietileno de alta densidade. No caso de não se pretender reter água, são utilizados materiais como calhaus rolados ou seixos e placas nervuradas de poliestireno expandido. Este último material é atualmente o mais utilizado porque além de contribuir para um melhor isolamento térmico da cobertura é mais leve quando comparado com os restantes [18].



Tabela 2.6 – Exemplos materiais constituintes da camada drenante, [25, 26].

Com retenção de água	Sem retenção de água
Polietileno de alta densidade	Gravilha



#### 2.5.5. CAMADA DE PROTEÇÃO

Esta camada funciona como proteção, da tela anti raiz e da membrana impermeável, às ações mecânicas efetuadas na fase de construção da obra, nomeadamente no que diz respeito às perfurações.

Como materiais mais utilizados nesta camada utilizam-se os geotexteis, porém existem outros como é o caso de telas plásticas, materiais drenantes (se tiverem resistência à aplicação de cargas) e placas de isolamento térmico (em coberturas invertidas), [18].

#### 2.5.6. BARREIRA ANTI RAIZ / TELA IMPERMEABILIZANTE




Esta barreira tem como objetivo proteger a tela impermeabilizante e a cobertura de betão das raízes provenientes da vegetação. É de grande importância a boa execução desta camada porque como as coberturas jardim implicam grandes quantidades de água e humidade uma falha poderia ter consequências gravosas [18].

Como forma de proteção, as soluções definidas consistem na utilização de produtos químicos incorporados na mistura betuminosa da membrana ou então de impermeabilizantes que já se encontram com essas particularidades [17].

Alguns exemplos de materiais mais utilizados nesta camada são:

- Os impermeabilizantes EPDM (monómero de etileno-propileno-dieno);
- PVC;
- Betume-polímero (dois tipos APP e SBS);

Tabela 2.7 – Materiais constituintes da barreira anti raiz / tela impermeabilizante, [27, 28, 29].

Material	Exemplo
Impermeabilizantes EPDM (monómero de etileno-propileno-dieno)	
PVC	
Betume-Polímero	

## 2.6. DETALHES CONSTRUTIVOS

As coberturas jardim quando aplicadas têm algumas particularidades na sua implementação. Serão aqui apresentados alguns pormenores construtivos que estão associados à execução deste tipo de coberturas.

### 2.6.1. COBERTURA JARDIM EXTENSIVA

Na Figura 2.12 apresenta-se o pormenor construtivo de coberturas jardim extensivas.

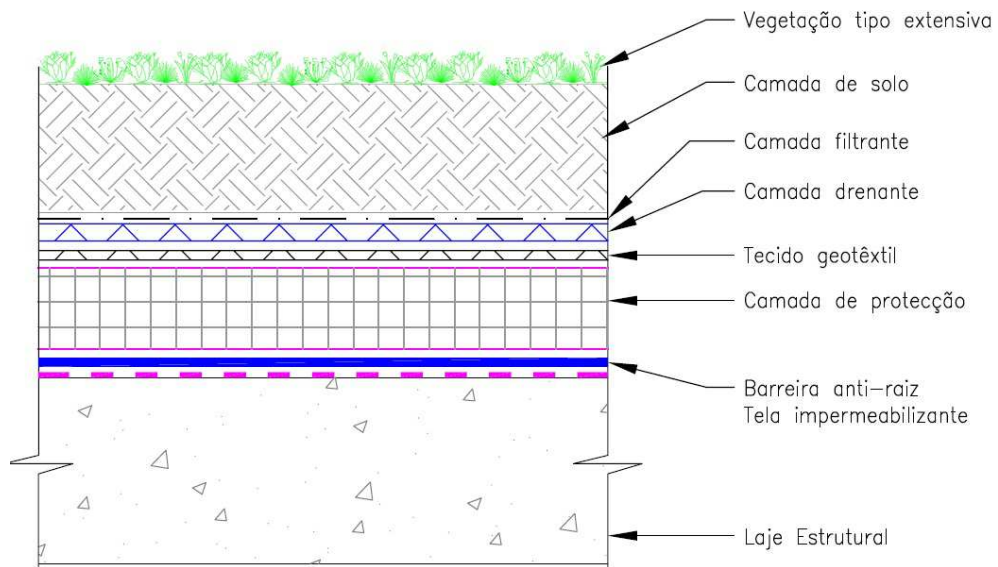


Figura 2.12 – Pormenor cobertura jardim extensiva, [30].

### 2.6.2. COBERTURA JARDIM INTENSIVA

A Figura 2.13 apresenta o pormenor construtivo de coberturas jardim intensivas.

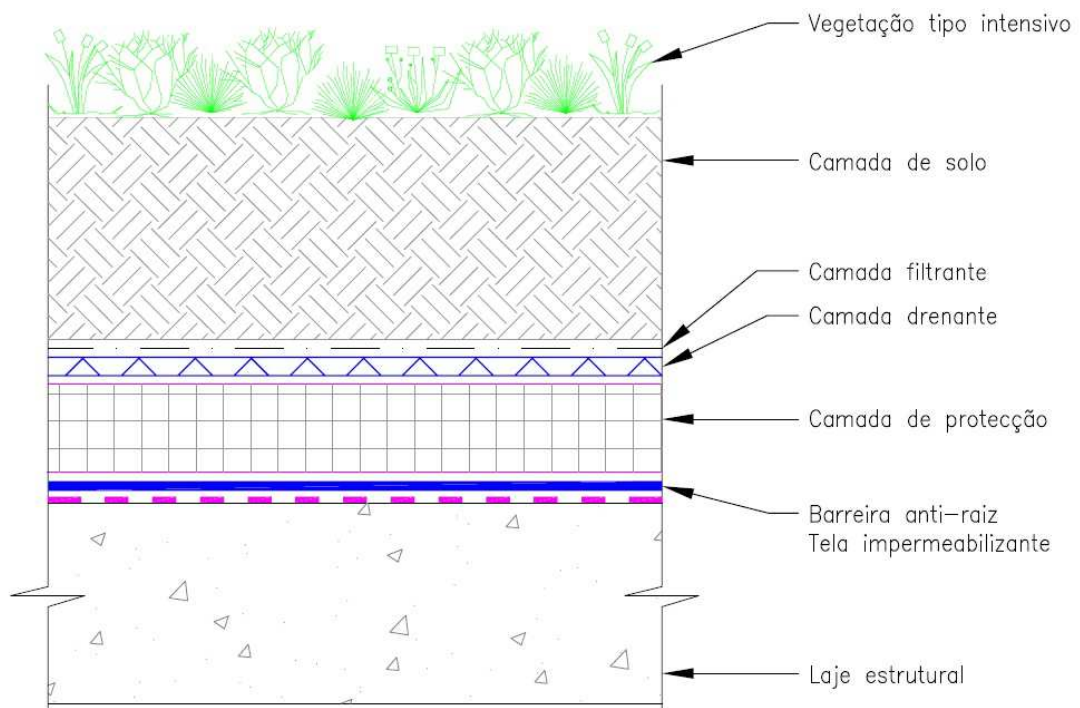


Figura 2.13 – Pormenor cobertura jardim intensiva, [30].

### 2.6.3. PORMENOR DE DRENAGEM

Na Figura 2.14 apresenta-se um pormenor construtivo do sistema de drenagem numa cobertura jardim.

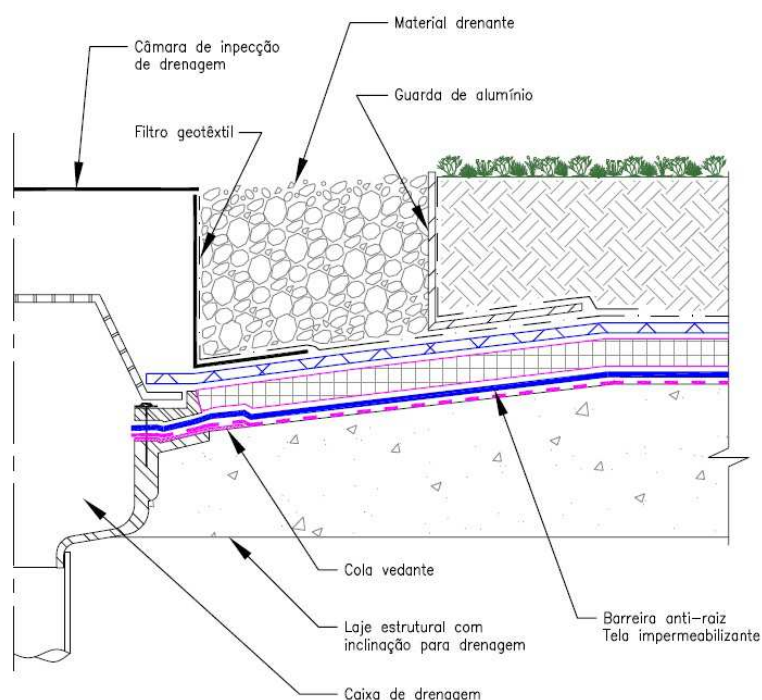


Figura 2.14 – Pormenor de um sistema de drenagem numa cobertura jardim, [30].

### 2.6.4. PORMENOR DE ACABAMENTO EM PARAPEITO

A Figura 2.15 apresenta um pormenor construtivo de um acabamento em parapeito de uma cobertura jardim.

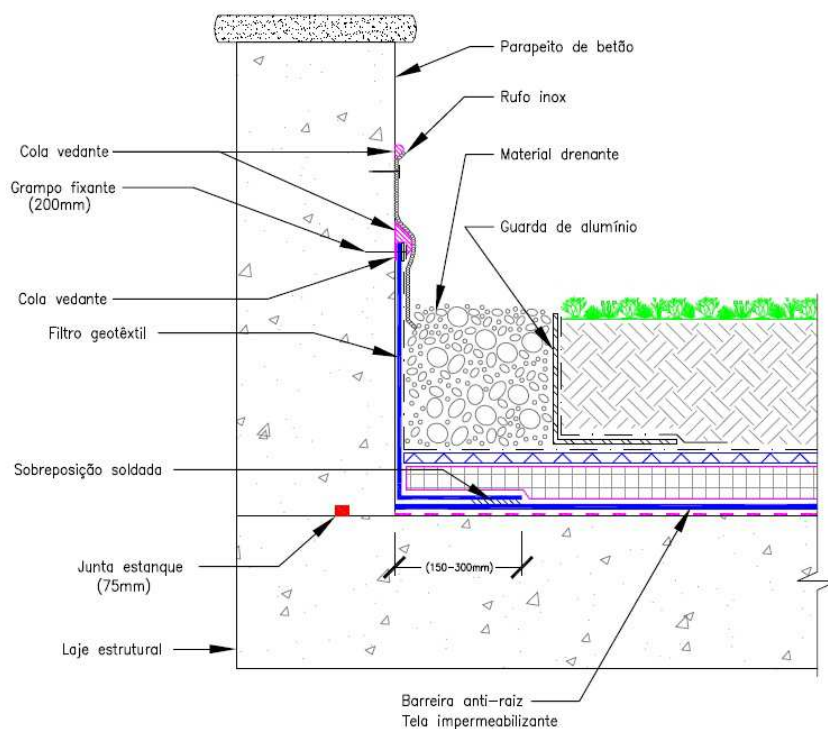


Figura 2.15 – Pormenor de um acabamento em parapeito, [30].

### 2.6.5. PORMENOR TRANSIÇÃO DE PAVIMENTO

A Figura 2.16 apresenta um pormenor construtivo numa transição de pavimento para cobertura jardim.

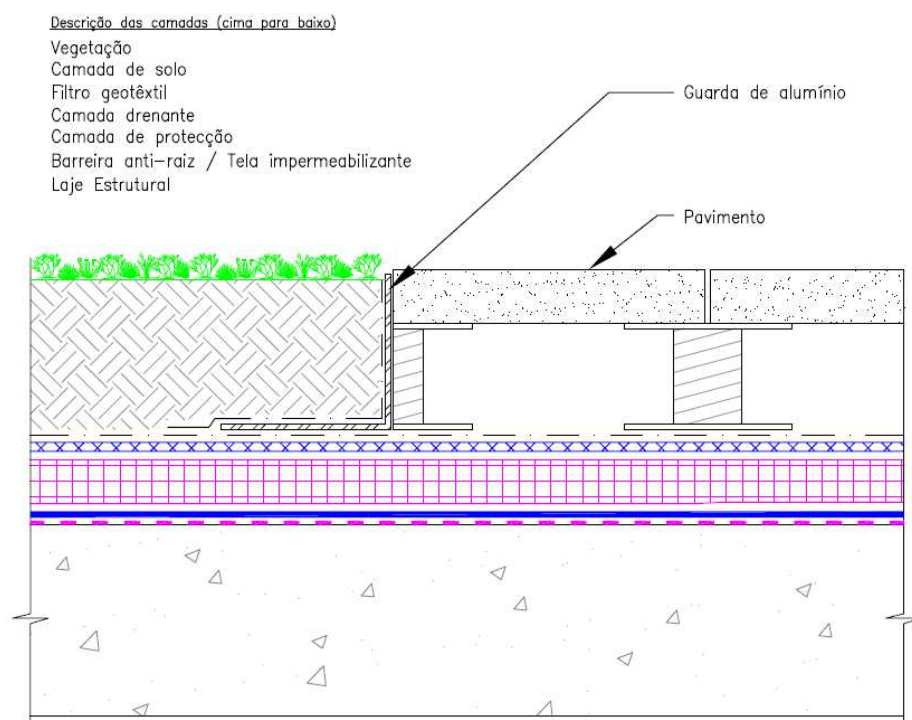


Figura 2.16 – Pormenor de transição de pavimento para cobertura jardim, [30].



# 3

## MODELO DE SIMULAÇÃO DE COBERTURAS JARDIM

### 3.1. MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO – ENERGYPLUS

Atualmente já existem ferramentas informáticas que facilitam a simulação dos comportamentos higrotérmicos num edifício permitindo auxiliar o trabalho do projetista no dimensionamento e adoção de soluções construtivas adequadas.

Uma dessas ferramentas disponíveis no mercado é o Software EnergyPlus. Este programa surge nos anos 70 e resultou da combinação de dois outros programas, o BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) e o DOE-2, desenvolvidos pelo Departamento da Energia Norte Americano. O EnergyPlus é uma das ferramentas de simulação higrotérmica mais utilizadas pois permite estimar trocas térmicas, ganhos solares, temperaturas e humidades relativas nos compartimentos e nas superfícies dos elementos construtivos e consumos de energia. Devido aos resultados fidedignos que apresenta é um programa mundialmente utilizado [31], [32], [33].

Este programa tem outras funcionalidades como: a introdução dos dados climáticos da região em formato TMY, que descreve o meio ambiente que rodeia a edificação, a definição de ocupação de cada zona, bem como a criação de agendamentos para simular a ocorrência de determinadas atividades [33].

Na presente dissertação pretendeu-se implementar um modelo de simulação de uma cobertura jardim numa habitação que já tem vindo a ser objeto de estudo através de outras ferramentas disponíveis no programa.

O EnergyPlus foi selecionado como a plataforma de simulação para a implementação do modelo de coberturas jardim por várias razões: é um dos programas mais atuais e avançados de simulação de energia nos edifícios; é o modelo que o Departamento de Energia dos Estados Unidos se comprometeu a apoiar no futuro; e a sua estrutura modular torna-o particularmente bem equipado para a incorporação de novas características [34].

Para melhor se compreender os resultados deste trabalho serão aqui referidos e descritos os modelos matemáticos em que o programa EnergyPlus se baseia para determinar os balanços energéticos das coberturas jardim.



### 3.2. MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE DO ENERGYPLUS

O programa EnergyPlus através do grupo *Simulation Parameters* no campo *HeatBalanceAlgorithm* fornece algoritmos que permitem a simulação da transferência de calor e de humidade:

- Modelo CTF – Conduction Transfer Function;
- Modelo EMPD – Effective Moisture Penetration Depth;
- Modelo HAMT – Combined Heat and Moisture Transfer;

Alguns trabalhos anteriores exploraram as vantagens e desvantagens de cada algoritmo [33] e [35], pelo que aqui será apenas enunciado o modelo (§3.2.1) utilizado nas simulações.

Apesar de o modelo tradicionalmente utilizado para simular as transferências de calor através de um elemento opaco ser o modelo CTF, este afasta-se do que acontece num edifício real por desprezar no seu cálculo o armazenamento e difusão de vapor nos elementos de construção [35].

Ao contrário, os modelos HAMT e EMPD descrevem a difusão do vapor de água numa zona e avaliam com maior precisão a humidade interior. Uma vez que o modelo HAMT por ser o mais rigoroso necessita do conhecimento detalhado das propriedades dos diversos materiais que constituem a zona de estudo e por vezes tal informação não se encontra disponível, há a necessidade de recorrer a modelos simplificados mas com resultados aproximados [35], como tal foi aqui utilizado o modelo EMPD.

#### 3.2.1. MODELO EMPD

No modelo EMPD a abordagem que permite simular a adsorção e libertação de vapor de água à superfície das paredes é um pouco mais complexa.

Este modelo assume que apenas uma fina camada, localizada na superfície mais interior da parede, se comporta de forma dinâmica e efetua trocas de vapor de água com o ar interior [36], isto é, a difusão de vapor de água entre o exterior e o interior, através das paredes, é desprezada e a fina camada interior absorve e liberta humidade quando exposta a variações de humidade do ar no interior [36].

A Figura 3.1 mostra como este modelo considera que uma fina camada da superfície mais interior efetua as trocas de vapor de água com o ar interior.

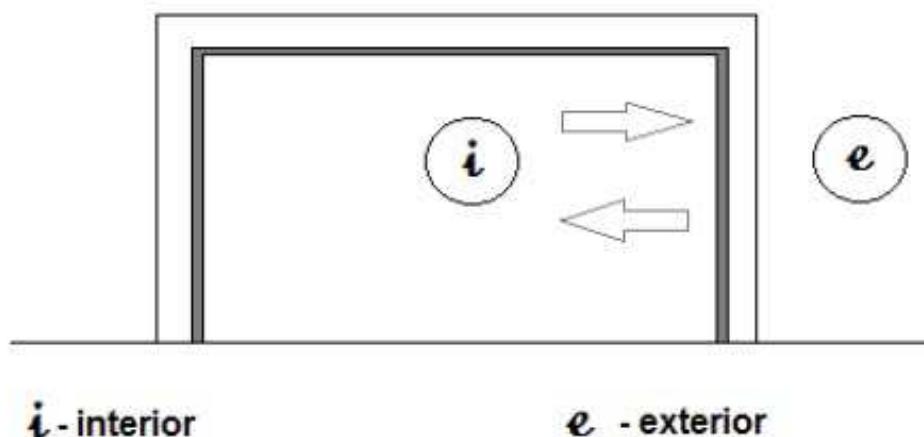


Figura 3.1 – Modelo de funcionamento EMPD, [33].



Para períodos de tempo curtos em que as variações de humidade são reduzidas e a adsorção / libertação de vapor de água da camada fina são pouco significativas, os resultados das simulações realizadas através deste modelo apresentam uma aproximação razoável a modelos mais detalhados.

### 3.3. MODELO DE COBERTURA JARDIM

#### 3.3.1. VISÃO GLOBAL

Há um reconhecimento generalizado e um crescimento de literatura com medição de dados que sugerem que as coberturas jardim podem reduzir o consumo de energia dos edifícios [8], [37].

Atualmente ainda há poucas ferramentas disponíveis para ajudar os investigadores e projetistas na avaliação da magnitude das poupanças de energia associados a várias opções de implementação (por exemplo, tipo de solo / profundidade, opções de irrigação, tipo de plantas). Como resultado, existe uma necessidade significativa de uma ferramenta quantitativa e fisicamente baseada na simulação energética dos edifícios que represente os efeitos da implantação de coberturas jardim. Essa ferramenta facilitaria uma expansão mais rápida da tecnologia das coberturas jardim.

Em resposta à necessidade deste tipo de ferramenta computacional que permita simular os efeitos das coberturas jardim, David J. Sailor do Departamento de Engenharia Mecânica e Materiais da Universidade de Portland, desenvolveu um modelo computacional que através dos processos de transferência de calor envolvidos numa cobertura com vegetação consegue simular esses efeitos [34].

O programa EnergyPlus, no objeto de entrada “*Material:RoofVegetation*” fornece esse modelo para coberturas jardim.

Desta forma o modelo tem em conta fenómenos associados às plantas e à camada de solo sendo eles:

- As trocas radiativas, onda curta e onda longa, dentro da copa da planta;
- Os efeitos de convecção de calor na copa da planta;
- A evapotranspiração do solo e das plantas;
- Condução de calor (e armazenamento) na camada de solo.

Implementando no programa o modelo de cobertura jardim, este permite ao utilizador definir esta tecnologia como sendo a camada exterior da cobertura de um edifício. O utilizador tem que introduzir parâmetros obrigatórios que são específicos deste tipo de cobertura. No que diz respeito às plantas, o índice de área foliar, a refletividade e a emissividade das folhas são de preenchimento obrigatório, relativamente à camada de solo é obrigatório a introdução de dados relativos à rugosidade, espessura, condutibilidade, densidade e calor específico do solo seco. Apesar de não ter sido utilizado neste trabalho é possível introduzir um sistema de irrigação que complemente este tipo de cobertura [36].

A formulação do modelo inclui o seguinte:

- O balanço simplificado da humidade que considera a precipitação, irrigação e o transporte de humidade entre duas camadas de solo (zona superior e zona da raiz);
- Balanço energético do solo e da copa da planta com base no Army Corps of Engineers’s FASST modelos de vegetação (Frankenstein e Koenig) baseando-se em BATS (Dickenson et al.) e SiB (Sellers et al.).

As equações da temperatura da superfície do solo ( $T_g$ ) e da folhagem ( $T_f$ ) são resolvidas simultaneamente a cada intervalo de tempo e o resultado final é um conjunto de duas equações simultâneas para a temperatura, uma para a superfície do solo e outra para a folhagem.

### 3.3.2. BALANÇO ENERGÉTICO DO MODELO DE COBERTURAS JARDIM

Tal como acontece com uma cobertura tradicional, o balanço energético de uma cobertura jardim é dominado pela radiação solar. Esta é equilibrada pelo fluxo de calor sensível (convecção) e latente (evaporação) proveniente do solo e das superfícies foliares das plantas combinadas com a condução de calor para dentro do substrato de solo [34].

O calor sensível consiste numa troca de calor, sempre que existe variação de temperatura entre duas zonas. Relativamente ao calor latente, este consiste numa transferência de calor que provoca a alteração do estado físico de uma substância através do fornecimento de energia.

Assim, o balanço energético pode ser compreendido através do esquema da Figura 3.2.

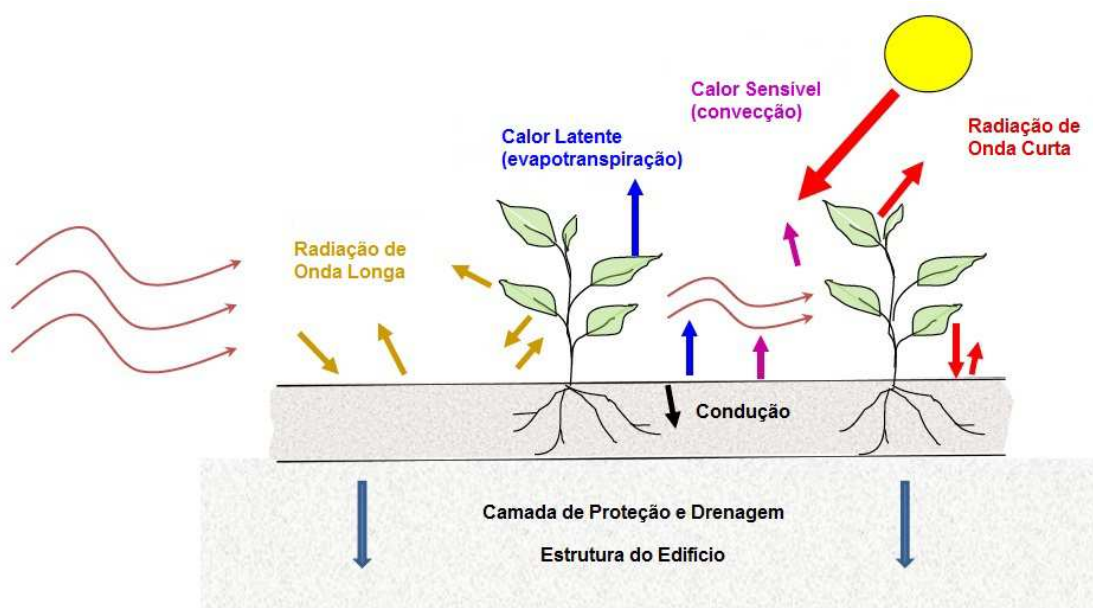


Figura 3.2 – Balanço energético para uma cobertura jardim, adaptado de [34].

A convenção de sinais utilizado pelo modelo FASST, modelo unidimensional que tem por base modelos de várias copas de plantas, assume que todos os fluxos de calor são positivos quando a energia é absorvida pela camada de solo.

Na descrição seguinte verifica-se que este balanço energético é subdividido num balanço para a camada de folhagem ( $F_f$ ) e num balanço para a superfície do solo ( $F_g$ ). As parametrizações para o fluxo de calor sensível e latente serão descritas com algum detalhe e, em seguida, será apresentada a solução simultânea de duas equações envolvendo as temperaturas da folhagem e da superfície do solo [36].

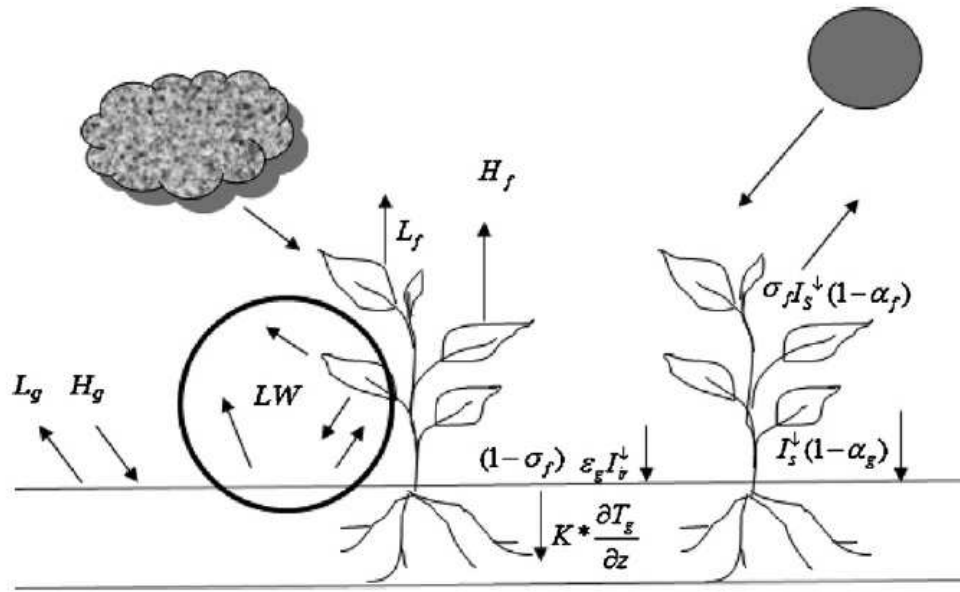


Figura 3.3 – Balanço energético para uma cobertura jardim, incluindo o fluxo de calor latente (L), fluxo de calor sensível (H), radiação de onda curta ( $I_s^{\downarrow}$ ) e entrada de radiação de onda longa ( $I_{ir}^{\downarrow}$ ). A condução para o solo e as complexas trocas de radiação de onda longa (LW) dentro da copa são também evidenciadas, adaptado de [34].

### 3.3.3. BALANÇO ENERGÉTICO DA CAMADA DE FOLHAGEM

O balanço energético da folhagem é dado por, [34]:

$$F_f = \sigma_f [I_s^{\downarrow}(1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir}^{\downarrow} - \varepsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad (3.1)$$

Além de transferência de calor convectiva e sensível a equação (3.1) tem em conta a radiação de onda curta e longa absorvidas pela vegetação, incluindo os efeitos das múltiplas reflexões.

Onde,

$F_f$  – balanço energético da camada de folhagem [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];

$\sigma_f$  – fração da cobertura vegetação;

$I_s^{\downarrow}$  – totalidade da radiação de onda curta de entrada [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];

$\alpha_f$  – albedo da copa;

$\varepsilon_f$  – emissividade da copa;

$I_{ir}^{\downarrow}$  – totalidade da radiação de onda longa de entrada [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];

$T_f$  – temperatura da folhagem [Kelvin];

$\varepsilon_g$  – emissividade da superfície do solo;

$\sigma$  – constante de Stefan-Boltzmann [ $5.699 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}^4$ ];

$\varepsilon_1$  – relação entre emissividade da copa e do solo ( $\varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_f \varepsilon_g$ ).

Nesta equação, o albedo da copa ( $\alpha_f$ ), associado à radiação de onda curta, assim como a emissividade da copa ( $\varepsilon_f$ ), são parâmetros que o utilizador terá que definir no EnergyPlus no campo correspondente à introdução de coberturas jardim.

De forma a se compreender o que é o albedo da copa, este define-se como sendo uma medida relativa da quantidade de radiação refletida, ocorre sobre superfícies de forma direta ou difusa, ou seja, é uma medida da refletividade da superfície de um corpo.

Os termos de fluxo de calor sensível e latente ( $H_f$  e  $L_f$ ) serão discutidos em seguida.

### 3.2.3.1 Fluxo de Calor Sensível na Camada de Folhagem

A transferência de calor sensível entre a folhagem e o ar da região envolvente da copa ( $H_f$ ) é influenciada pela diferença de temperatura entre eles, a velocidade do vento e o índice de área foliar (LAI).

O fluxo de calor sensível é definido pela equação (3.2), [34]:

$$H_f = (1.1LAI\rho_{af}C_{p,a}C_fW_{af})(T_{af} - T_f) \quad (3.2)$$

Onde,

$H_f$  – fluxo de calor sensível na camada de folhagem [ $W/m^2$ ];

1.1 – constante que considera a transferência de calor do caule, ramos e folhas da planta;

LAI – índice de área foliar [ $m^2/m^2$ ];

$\rho_{af}$  – massa volúmica do ar na temperatura de folhagem [ $kg/m^3$ ];

$C_{p,a}$  – é o calor específico do ar a pressão constante [ $1005.6 J/kg K$ ];

$C_f$  – coeficiente de transferência de calor;

$W_{af}$  – velocidade do vento dentro da folhagem [ $m/s$ ];

$T_{af}$  – temperatura do ar dentro da copa [Kelvin];

$T_f$  – temperatura da folhagem [Kelvin].

Outro parâmetro que o utilizador terá que definir no programa será o índice de área foliar (LAI). O índice de área foliar é a razão entre a área foliar da copa e a unidade de superfície projetada no solo [38].

O fator velocidade do vento dentro da folhagem ( $W_{af}$ ), da equação (3.2), é calculado pela expressão seguinte:

$$W_{af} = 0.83\sigma_f W \sqrt{C_{hn}^f} + (1 - \sigma_f)W \quad (3.3)$$

Onde o fator  $C_{hn}^f$  é o coeficiente de transferência das condições de estabilidade atmosférica quase neutras na folhagem que tem como base de cálculo a equação (3.4).

$$C_{hn}^f = K_v^2 \left( \ln \left( \frac{Za - Zd}{Z_0^f} \right) \right)^{-2} \quad (3.4)$$

Em que os fatores  $Zd$  e  $Z_0^f$  dependem de outro parâmetro que o utilizador terá que introduzir no programa, que corresponde à altura das plantas em metros.

### 3.2.3.2 Fluxo de Calor Latente na Camada de Folhagem

O processo de perda de água através da respiração das plantas é conhecido como transpiração. É controlado pela abertura e fecho dos estômatos que são estruturas constituídas por um conjunto de células localizadas na epiderme, especialmente na face inferior das folhas, com a função de estabelecer a comunicação do meio interno com a atmosfera.

O fluxo de calor latente é definido pela equação (3.5), [34]:

$$L_f = l_f LAI \rho_{af} C_f W_{af} r'' (q_{af} - q_{f,sat}) \quad (3.5)$$

Onde,

$L_f$  – fluxo de calor latente na camada de folhagem [W/m<sup>2</sup>];

$l_f$  – calor latente de vaporização da temperatura de folhagem [J/kg];

$r''$  – fator de humidade da superfície da folha;

$q_{af}$  – coeficiente de homogeneização do ar dentro da copa;

$q_{f,sat}$  – relação do coeficiente de homogeneização saturado à temperatura da superfície da folha.

Mais uma vez o parâmetro de cálculo  $LAI$  entra na equação (3.5) correspondente ao fluxo de calor latente na camada de folhagem.

O fator de humidade da superfície da folha ( $r''$ ) depende da resistência aerodinâmica ( $r_a$ ), que por sua vez é influenciada pela velocidade do vento, rugosidade da superfície e estabilidade atmosférica, e da resistência estomática das folhas ( $r_s$ ), equação (3.6).

$$r'' = \frac{r_a}{r_a - r_s} \quad (3.6)$$

A resistência estomática das folhas tem especial interesse porque depende de outro parâmetro de cálculo, resistência estomática mínima, que o utilizador terá que definir para as coberturas jardim.

### 3.3.4. BALANÇO ENERGÉTICO DA CAMADA DE SOLO

O balanço energético na superfície do solo é influenciado principalmente pelas propriedades térmicas do solo, a quantidade de cobertura de folhagem ( $\sigma_f$ ) e a quantidade de humidade no solo. O balanço global da energia na superfície do solo é definido pela equação (3.7), [34]:

$$F_g = (1 - \sigma_f) [I_s^\downarrow (1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_g T_g^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K * \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (3.7)$$

Tal como acontece com a equação de energia para a folhagem, esta equação representa o fluxo de calor sensível ( $H_g$ ), o fluxo de calor latente ( $L_g$ ) e as consequências associadas à radiação de onda curta e longa. O último termo da equação traduz a condução de calor para o substrato de solo.

#### 3.2.4.1 Fluxo de Calor Sensível na Camada de Solo

O fluxo de calor sensível entre a superfície do solo e do ar é dependente da diferença de temperatura entre eles e da velocidade do vento na copa. É definido pela equação (3.8), [34]:

$$H_g = \rho_{ag} C_{p,a} C_h^g W_{af} (T_{af} - T_g) \quad (3.8)$$

Onde,

$H_g$  – fluxo de calor sensível na camada de solo [ $\text{W/m}^2$ ];

$C_h^g$  – coeficiente de transferência de calor sensível na camada de solo;

$\rho_{ag}$  – massa volúmica do ar na proximidade da superfície do solo [ $\text{kg/m}^3$ ].

#### 3.2.4.2 Fluxo de Calor Latente na Camada de Solo

A remoção do vapor de água a partir da superfície do solo depende da diferença entre o rácio da superfície do solo e do ar, e a velocidade do vento no interior da copa. O fluxo de calor latente é definido pela equação (3.9), [34]:

$$L_g = C_e^g l_g W_{af} \rho_{ag} (q_{af} - q_g) \quad (3.9)$$

Onde,

$L_g$  – fluxo de calor latente na camada de solo [ $\text{W/m}^2$ ];

$C_e^g$  – coeficiente de transferência de calor latente na camada de solo;

$l_g$  – calor latente de vaporização na superfície do solo [ $\text{J/kg}$ ];

$q_g$  – coeficiente de homogeneização da superfície do solo;

$q_{af}$  – coeficiente de homogeneização do ar no interior da copa.

No campo **Material:RoofVegetation** do EnergyPlus também são definidos parâmetros de cálculo para a camada de solo. Alguns desses parâmetros como é o caso da espessura e da rugosidade são utilizados nas expressões (3.7) e (3.8) respetivamente, porém outros dos parâmetros que definem a camada de solo serão usados nas expressões de cálculo gerais do EnergyPlus.

### 3.4. ENERGYPLUS – PARÂMETROS DE CÁLCULO DE COBERTURAS JARDIM

Foi descrito atrás que o programa EnergyPlus utiliza as equações do balanço energético da folhagem (equação 3.1) e do balanço energético do solo (equação 3.7) para simular o comportamento higrotérmico de uma cobertura jardim.

De modo a efetuar esta simulação é necessário definir as características do material constituinte deste tipo de cobertura. Para isso, o utilizador tem que aceder ao menu do *IDF Editor* e no grupo *Surface Construction Elements* seleccionar o campo **Material:RoofVegetation** (Figura 3.4).

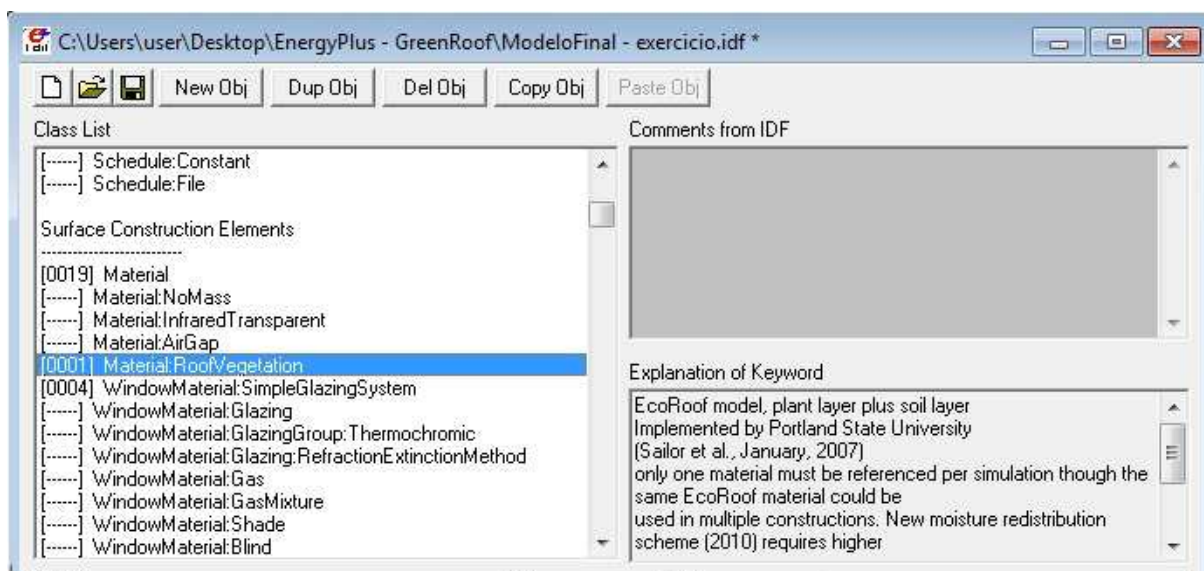


Figura 3.4 – Grupo Material:RoofVegetation.

O preenchimento dos dados que o EnergyPlus necessita para o cálculo das equações atrás mencionadas, para além do nome que o utilizador tem que definir, são:

- Altura das plantas;
- Índice de área foliar;
- Refletividade da folha;
- Emissividade da folha;
- Resistência estomática mínima;
- Nome da camada de solo;
- Rugosidade;
- Espessura;
- Condutibilidade do solo seco;
- Massa volúmica do solo seco;
- Calor específico do solo seco;
- Absortância térmica;
- Absortância solar;
- Absortância visível.

Todos estes parâmetros de cálculo de coberturas jardim são limitados por um intervalo de valores definido pelo próprio programa. Porém, nem todos estes parâmetros são de preenchimento obrigatório. O EnergyPlus já assume valores de referência que juntamente com o intervalo de valores serão a base da análise de sensibilidade, objetivo principal deste trabalho. Na Tabela 3.1 será apresentada a descrição de cada um dos parâmetros que terá influência no cálculo.

Tabela 3.1 – Descrição dos parâmetros de cálculo de coberturas jardim, [34].

Propriedades	Unidades	Descrição
Nome		Valor alfanumérico, nome que o utilizador atribui à cobertura jardim.
Altura das Plantas	(m)	Projetado para plantas de pequeno ou médio porte.
Índice de área foliar	(-)	Área projetada da folha por unidade de área da superfície do solo.
Refletividade da folha	(-)	Fração de radiação solar incidente refletida pela superfície de folha individual. A radiação solar inclui o espectro visível bem como os comprimentos de onda dos infravermelhos e ultravioleta.
Emissividade da folha	(-)	Razão entre a radiação térmica emitida pela superfície da folha pela que é emitida por um corpo negro ideal à mesma temperatura. Este parâmetro é utilizado no cálculo das trocas de radiação de onda longa na superfície da folha.
Resistência estomática mínima	(s/m)	Resistência das plantas ao transporte de humidade. As Plantas com valores baixos de resistência estomática terão maiores taxas de evapotranspiração do que as com valores de resistência mais elevada.
Nome camada de solo		Valor alfanumérico, nome de referência que o utilizador atribui à camada de solo da cobertura jardim.
Rugosidade	(-)	Escolhido através de uma lista de opções, define a rugosidade relativa de uma camada de material específico (muito áspero, áspero, médio áspero, médio suave, suave e muito suave). Este parâmetro influencia apenas o coeficiente de convecção exterior.
Espessura	(m)	Profundidade da camada de substrato.
Condutibilidade do solo seco	(W/mK)	Condutibilidade térmica do substrato seco.
Massa volúmica do solo seco	(kg/m <sup>3</sup> )	Massa volúmica do substrato seco.
Calor específico do solo seco	(J/kgK)	Calor específico do substrato seco.
Absortância térmica	(-)	Fração do comprimento de onda longo da radiação incidente que é absorvida pelo substrato.
Absortância solar	(-)	Fração da radiação solar incidente que é absorvida pelo substrato.
Absortância visível	(-)	Fração do comprimento de onda visível da radiação incidente que é absorvida pelo substrato.



Na Tabela 3.2 resume-se os valores de referência que o programa fornece após criar o objeto no campo **Material:RoofVegetation**, assim como o intervalo de valores em que é permitido variar os parâmetros.

Tabela 3.2 – Valores de referência e intervalo de valores dos parâmetros de cálculo de coberturas jardim.

ID	Propriedades	Unidades	Valor Referência	Mínimo	Máximo
A1	Nome*		-	-	-
N1	Altura das Plantas	(m)	0.2	]0.005	1]
N2	Índice de área foliar*	(-)	1	]0.001	5]
N3	Refletividade da folha*	(-)	0.22	[0.05	0.5]
N4	Emissividade da folha*	(-)	0.95	[0.8	1]
N5	Resistência estomática mínima	(s/m)	180	[50	300]
A2	Nome camada de solo		-	-	-
A3	Rugosidade*	(-)	-	-	-
N6	Espessura*	(m)	0.1	]0.05	0.7]
N7	Condutibilidade do solo seco*	(W/mK)	0.35	[0.2	1.5]
N8	Massa volúmica do solo seco*	(kg/m <sup>3</sup> )	1100	[300	2000]
N9	Calor específico do solo seco*	(J/kgK)	1200	]500	2000]
N10	Absortância térmica	(-)	0.9	]0.8	1]
N11	Absortância solar	(-)	0.7	[0.4	0.9]
N12	Absortância visível	(-)	0.75	]0.5	1]
N13	Teor de humidade de saturação volumétrica da camada de solo	(-)	0.3	]0.1	0.5]
N14	Teor de humidade residual do volume da camada de solo	(-)	0.01	[0.01	0.1]
N15	Teor de humidade volumétrica inicial da camada de solo	(-)	0.1	]0.05	0.5]
A4	Método de cálculo da difusão de humidade	(-)	Simple	(-)	(-)

\* Propriedades de preenchimento obrigatório no Energyplus

Depois de definir o material constituinte da cobertura jardim o utilizador poderá aplicar esta cobertura como sendo a camada mais exterior da construção em todo o elemento da cobertura ou então aplicar

só em zonas específicas. Neste estudo esta camada foi aplicada em toda a sua área. Caso seja desejável, também é possível incluir várias camadas como o isolamento, proteção, etc. na cobertura jardim usando as capacidades do EnergyPlus.

O método de análise do programa quando encontra a camada exterior da construção verifica se o material é do tipo cobertura jardim. Se for, então o programa utiliza o conjunto de equações que acima foram descritas para determinar as temperaturas da vegetação e do solo, assim como o fluxo de calor que atravessa essa cobertura.

### 3.5. CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA COBERTURA JARDIM

Os parâmetros introduzidos no modelo cobertura jardim do programa necessitam de ser calculados para que a informação seja a mais real possível.

A Tabela 3.3 apresenta alguns dos instrumentos de medição dos parâmetros associados às propriedades das plantas assim como as fontes de informação sobre o instrumento.

Tabela 3.3 – Instrumento de medição dos parâmetros das plantas.

Parâmetros das Plantas	Instrumento de medição	Fonte
Altura das Plantas	Fita métrica	-
Índice de Área Foliar	LAI 2000	[39]
Refletividade da Folha	Espectro radiômetro LI – 1800 UniSpec-SC	[40], [41] e [42]
Emissividade da Folha	Camera Termográfica	[43]
Resistência Estomática Mínima	Porometro de Difusão	[44] e [45]

Os métodos de determinação destes parâmetros descritos na tabela caracterizam-se por serem auxiliados por aparelhos que na obtenção da informação não destroem a amostra.

Apesar de estes aparelhos medirem os parâmetros descritos, a limitação dos resultados da sua utilização depende de alguns fatores tais como:

- Radiação solar;
- Humidade do ar;
- Temperatura do ar;
- Pressão atmosférica;
- Poeiras atmosféricas.
- E outros resultantes da atividade humana;

A limitação dos resultados encontra-se também dependente da composição química e orgânica do solo, uma vez que o desenvolvimento das espécies vegetais é condicionado por essas características do solo, além das condicionantes ambientais acima descritas.

Não sendo estas medições objeto de estudo deste trabalho, reconhece-se a necessidade de posterior desenvolvimento deste assunto com o detalhe adequado.

### 3.6. DESCRIÇÃO DO CASO EM ESTUDO

#### 3.6.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GERAL

A habitação que serve de modelo para o desenvolvimento deste trabalho pertence a um edifício que se situa no bairro de Lordelo, localizado na freguesia de Lordelo do Ouro, no concelho do Porto.

O edifício em estudo faz parte de um conjunto de habitações sociais deste bairro, construído em 1978, sendo constituído por 4 blocos com um total de 179 fogos.

Recentemente por ação da Câmara do Porto o bairro sofreu uma intervenção de reabilitação dos edifícios que o compõem de forma a melhorar as condições de habitabilidade dos seus moradores.

O caso de estudo corresponde a um apartamento T3, localizado no quarto andar do bloco nº14. Situa-se entre outros dois apartamentos tendo duas frentes, voltadas para Nordeste e Sudoeste respetivamente (Figura 3.5). A caracterização detalhada dos materiais que foram usados neste edifício e nesta habitação em particular não são objeto de pormenorização desta dissertação, esse detalhe de pormenor foi anteriormente desenvolvido noutras dissertações [33] e [35].



Figura 3.5 – Vista aérea do bairro de Lordelo, bloco 14, [7].

No presente trabalho utilizou-se esta habitação T3 modelo de forma a simular o comportamento térmico que a implementação de uma cobertura jardim poderia provocar no seu interior.

É importante referir que a introdução deste tipo de solução é feita através de simulações com o programa EnergyPlus sem que o edifício em causa tivesse qualquer tipo de construção com este sistema construtivo na sua cobertura.

#### 3.6.2. APARTAMENTO EM ESTUDO

O apartamento de tipologia T3 que aqui serve de modelo base de simulação foi disponibilizado pelo Engenheiro António Curado. É constituído por um pequeno hall de entrada, que dá acesso à cozinha e à sala. A cozinha incorpora ainda uma zona de lavandaria que assim como a sala, o quarto de banho e o quarto 1 são voltados a Nordeste, os quartos 2 e 3 são voltados a Sudoeste.

Neste estudo foram definidas 7 zonas térmicas, a Tabela 3.4 identifica essas zonas assim como a orientação das fachadas e as áreas respectivas de cada compartimento.

Tabela 3.4 – Identificação das zonas, orientação e área de cada compartimento.

Zonas	Compartimento	Orientação	Área (m <sup>2</sup> )
1	Quarto 1	Nordeste	11,18
2	Casa de Banho	Nordeste	5,92
3	Sala e Hall de entrada	Nordeste	19,79
4	Cozinha e Lavandaria	Nordeste	10,08
5	Quarto 2	Sudoeste	9,28
6	Quarto 3	Sudoeste	11,18
7	Caixa de Escadas	Sudoeste	7,95

Como se poderá facilmente verificar através da Figura 3.6 as zonas térmicas em que se dividiu o apartamento são perfeitamente identificáveis e será esta a configuração adotada nos resultados que posteriormente serão aqui apresentados.

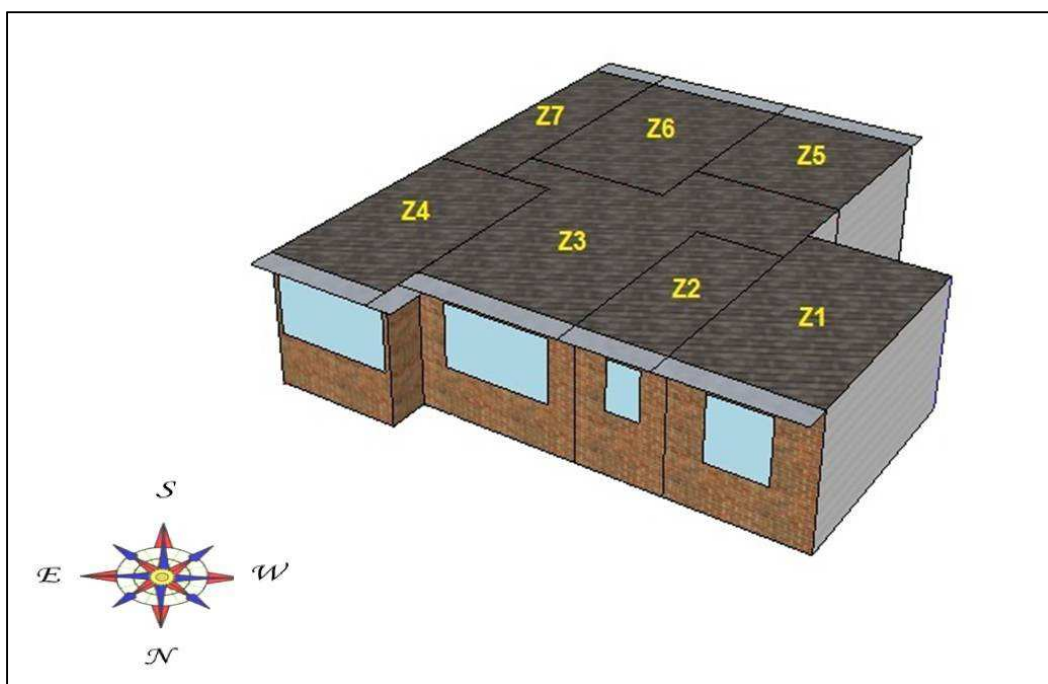


Figura 3.6 – Identificação das zonas da habitação T3.

# 4

## RESULTADOS, COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO

### 4.1. INTRODUÇÃO

É objetivo deste trabalho simular o comportamento de uma cobertura jardim quando implementada num edifício e através das suas características fazer uma análise de sensibilidade dos parâmetros que terão mais influência no desempenho deste tipo de cobertura.

No presente capítulo são apresentados os resultados dos diferentes cenários de simulação que foram efetuados, dando-se especial atenção aos efeitos da temperatura no interior de uma habitação modelo.

A estrutura do capítulo englobará a descrição dos cenários de simulação e a apresentação dos comportamentos higrotérmicos globais correspondentes, de uma comparação entre dois compartimentos semelhantes em termos de área mas com orientações diferentes e por fim uma análise de sensibilidade dos parâmetros de cálculo das coberturas jardim.

### 4.2. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Neste trabalho, foram realizados diferentes cenários de simulação de forma a obter-se uma melhor compreensão dos efeitos que a implementação de uma cobertura jardim pode originar no interior de uma habitação. Apesar do programa calcular as temperaturas em todos os compartimentos da habitação, o estudo que aqui é apresentado será focado na análise da Zona 1 – Quarto 1, que foi definida anteriormente (§3.5.2).

Antes de se descreverem as especificidades que a cada cenário dizem respeito é importante referir que existem alguns fatores que serão mantidos constantes em cada uma das simulações.

De acordo com o RCCTE, a taxa de renovação do ar é o caudal horário de entrada de ar novo num edifício ou fração autónoma para renovação do ar interior [46], como tal e para a habitação em estudo assumiu-se que esta é ventilada com uma taxa de renovação horária (Rph) de  $0,6 \text{ h}^{-1}$ .

Os ganhos internos considerados na habitação são outro dos fatores que se mantiveram constantes nas simulações. Estes ganhos devem-se à presença dos moradores, às suas atividades, à iluminação existente e equipamentos elétricos. Porém neste caso apenas foi considerada a presença de duas pessoas no interior do quarto.

Depois de referidos os fatores que são comuns a cada ambiente de simulação, apresentam-se os cenários de simulação que foram estudados, são eles:

- Simulação 1 – Sem Cobertura Jardim (sem exposição solar da cobertura);
- Simulação 2 – Sem Cobertura Jardim (com exposição solar da cobertura);
- Simulação 3 – Com Cobertura Jardim (com exposição solar e sem isolamento);
- Simulação 4 – Com Cobertura Jardim (com exposição solar e isolamento 8 cm).

Em seguida serão expostos mais detalhadamente estes cenários de simulação.

#### 4.2.1. SIMULAÇÃO 1

No cenário de simulação 1 pretende-se simular o comportamento real da habitação, isto é, simulou-se a habitação de acordo com a sua construção no local, com uma cobertura em chapa sandwich que não permite o contacto direto do sol com o isolamento de poliestireno extrudido de 8 cm, pelo que no programa se definiram todas as coberturas dos compartimentos sem exposição solar, por estarem protegidos pela cobertura em chapa.

#### 4.2.2. SIMULAÇÃO 2

Neste cenário de simulação, contrariamente ao que acontecia na simulação 1, considera-se que a cobertura, que é constituída pela sua estrutura de betão e por um isolamento de poliestireno extrudido, se encontra exposta ao sol.

Devido à exposição solar, que agora se está a simular, este cenário caracteriza-se por se fazer variar o coeficiente de absorção solar do material exterior que está em contacto direto com o sol e por variar a espessura desse mesmo material. Como tal este cenário está subdividido em 3 simulações (Tabela 4.1).

O coeficiente de absorção solar é condicionado pela cor do material e está compreendido no intervalo de valores 0 e 1, isto é, se o material apresentar cor escura maior é a sua capacidade de absorção solar.

Tabela 4.1 – Cenário geral da Simulação 2.

Simulações	Cenário de simulação
Simulação 2A	Coeficiente absorção solar $\alpha = 0,4$ + isolamento 8 cm
Simulação 2B	Coeficiente absorção solar $\alpha = 0,8$ + isolamento 8 cm
Simulação 2C	Coeficiente absorção solar $\alpha = 0,4$ + isolamento 16 cm

#### 4.2.3. SIMULAÇÃO 3

Neste cenário já é simulada a implementação de um jardim em toda a área de cobertura da habitação. Aqui a cobertura jardim será aplicada diretamente na estrutura do edifício sem qualquer material de isolamento entre elas. Esta cobertura é constituída por uma camada de vegetação e solo que estão expostas ao sol.

#### 4.2.4. SIMULAÇÃO 4

Esta simulação é em tudo idêntica ao cenário de simulação anterior, contudo foi introduzida uma camada de isolamento de poliestireno extrudido com 8 cm entre a camada de solo e a estrutura de betão.

#### 4.2.5. RESUMO DAS SIMULAÇÕES

Na Tabela 4.2 está feito um resumo geral dos cenários de simulação que foram admitidos e que serviram de base para o cálculo dos resultados que serão apresentados neste capítulo.

Tabela 4.2 – Resumo das simulações.

Simulações	Características de simulação
Simulação 1	Sem exposição solar com isolamento 8 cm
Simulação 2A	Coeficiente absorção solar $\alpha = 0,4$ + isolamento 8 cm
Simulação 2B	Coeficiente absorção solar $\alpha = 0,8$ + isolamento 8 cm
Simulação 2C	Coeficiente absorção solar $\alpha = 0,4$ + isolamento 16 cm
Simulação 3	Com cobertura jardim (exposição solar) sem isolamento
Simulação 4	Com cobertura jardim (exposição solar) + isolamento 8 cm

#### 4.3. COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO GLOBAL

O comportamento higrotérmico depende de vários parâmetros, mas prende-se, particularmente, com as condições climáticas e o tipo de construção, que depende da região onde seja construído o edifício.

Tal como foi referido, na descrição dos cenários de simulação, os resultados que aqui são apresentados para o comportamento higrotérmico global são relativos a um dos compartimentos da habitação. Na Tabela 4.3 estão definidas as características do compartimento em estudo.

Tabela 4.3 – Características do compartimento utilizado nas simulações.

Zona	Compartimento	Orientação	Área (m <sup>2</sup> )	Ganhos internos
Z1	Quarto 1	Fachada Nordeste	11,18	2 pessoas (0:00-8:00)

## 4.3.1. TEMPERATURA ANUAL

A Figura 4.1 representa a evolução da temperatura ao longo do ano.

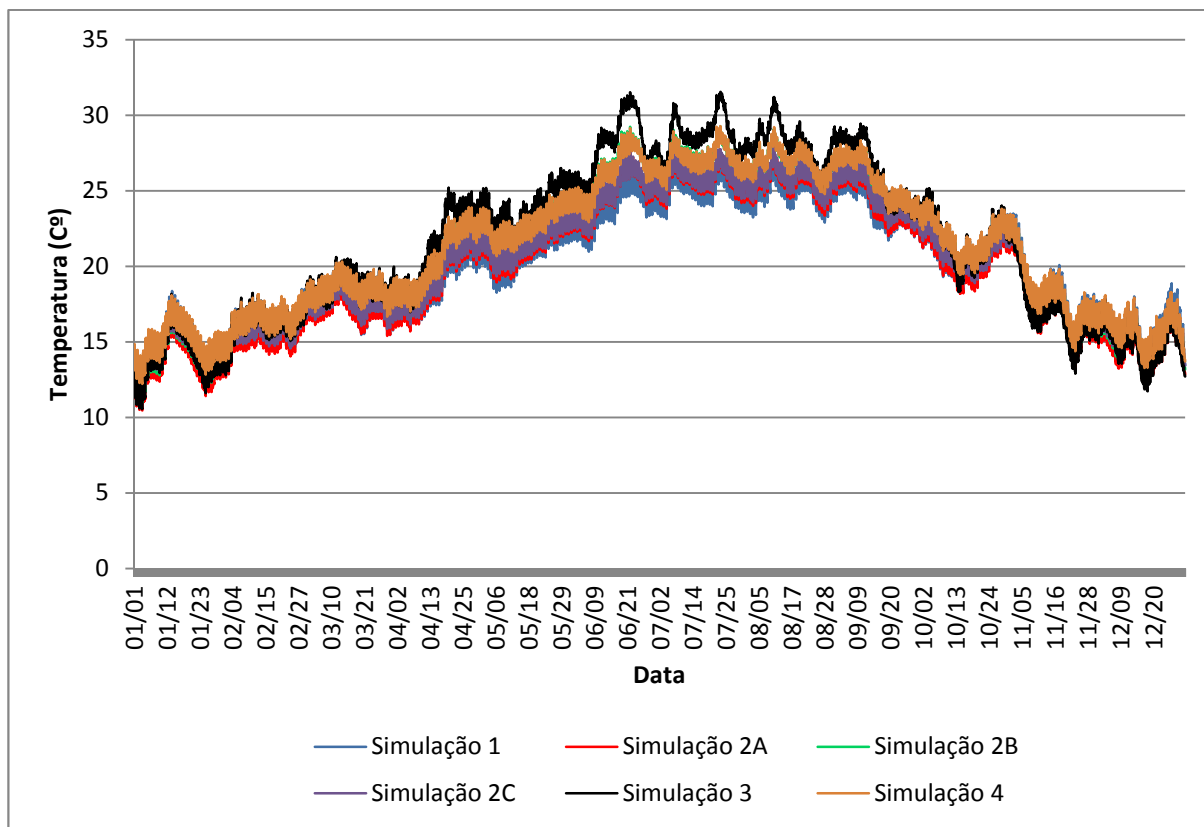


Figura 4.1 – Temperatura Anual Zona 1 – Quarto 1.

Através da figura pode-se observar que de uma forma geral:

- As temperaturas mais baixas ocorrem nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro, que correspondem ao inverno;
- O registo da temperatura mais baixa ocorre no mês de Janeiro com aproximadamente 10°C;
- As temperaturas mais elevadas ocorrem em finais do mês de Junho e nos meses de Julho e Agosto, que correspondem ao verão;
- A temperatura máxima registada é de aproximadamente 32°C;
- A Simulação 3 apresenta a maior amplitude térmica anual;
- No Inverno as simulações que apresentam temperaturas mais baixas são: Simulação 2A e Simulação 3;
- No inverno a simulação que apresenta temperaturas mais elevadas é a Simulação 1 e a Simulação 4;
- No verão a simulação que se destaca com os valores de temperatura mais elevados é a Simulação 3;
- No verão a simulação que apresenta temperaturas mais baixas é a Simulação 1.



## 4.3.2. TEMPERATURA MÉDIA ANUAL

A Figura 4.2 representa a temperatura média anual de cada mês.

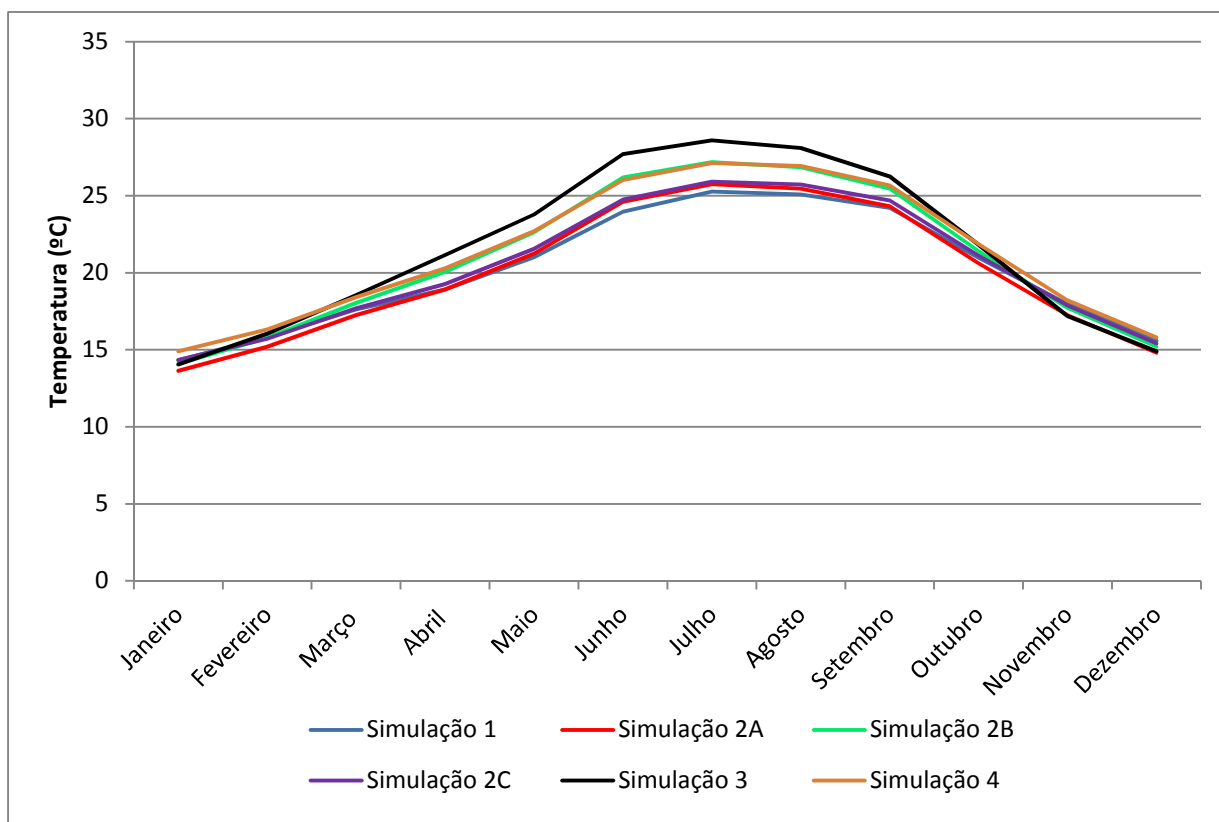


Figura 4.2 – Temperatura Média Anual Zona 1 – Quarto 1.

Através desta figura verifica-se as seguintes situações:

- A maior diferença da temperatura nas várias simulações ocorre no mês de Julho.
- Em todas as simulações a menor temperatura ocorre no mês de Janeiro;
- Em todas as simulações o valor da temperatura no mês de Dezembro é muito semelhante.
- Nos meses correspondentes ao inverno a Simulação 2A e a Simulação 3 têm valores mínimos muito próximos;
- No verão a Simulação 3 regista os valores mais elevados da temperatura;
- A Simulação 3 apresenta a maior amplitude térmica anual, atingindo a maior temperatura em Julho e a menor em Janeiro;
- A Simulação 2B e a Simulação 4 apresentam as suas curvas praticamente coincidentes a partir do mês de Abril até ao mês de Outubro. O afastamento destas curvas verifica-se nos meses de Dezembro e Janeiro com a Simulação 4 a ter valores de temperatura superiores;
- A Simulação 2C como se pode observar também apresenta a sua curva de temperaturas quase coincidente com a curva da Simulação 2A.

### 4.3.3. HUMIDADE RELATIVA

A Figura 4.3 corresponde à humidade relativa anual.

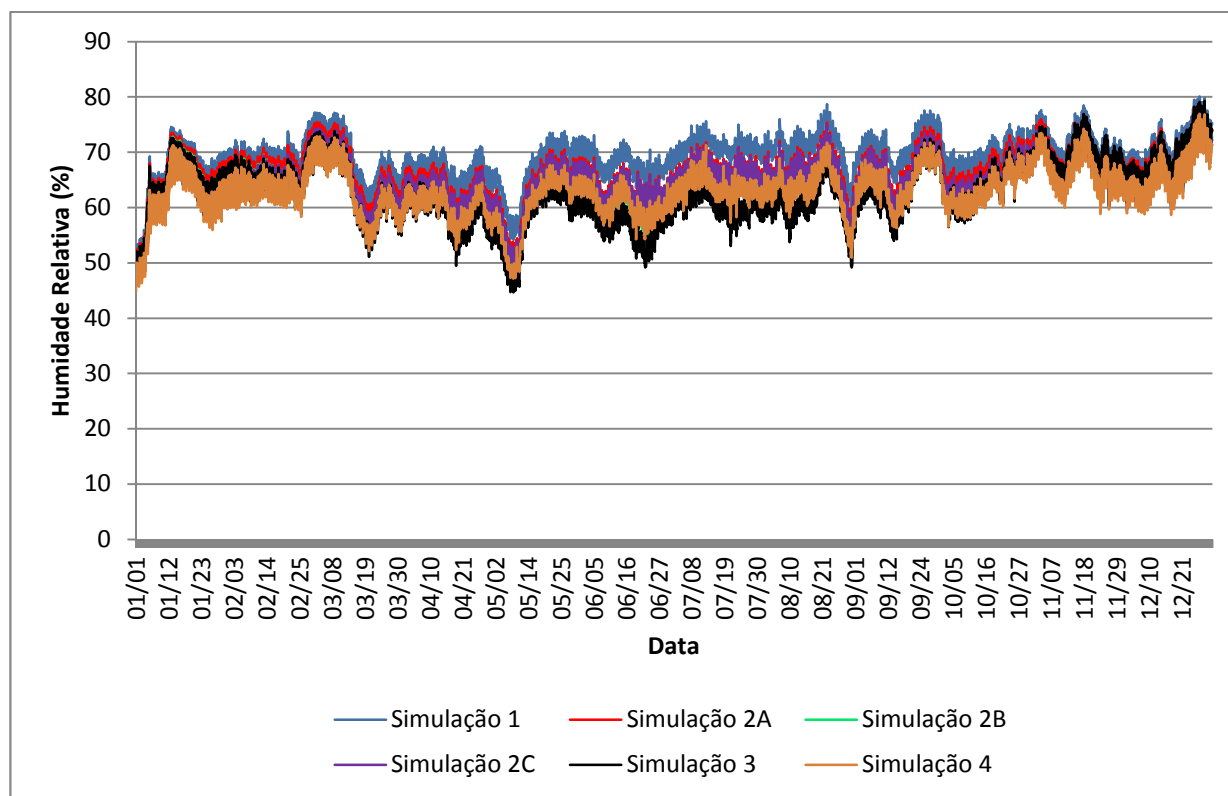


Figura 4.3 – Humidade Relativa Anual Zona 1 – Quarto 1.

Através da figura verifica-se que de uma forma geral:

- A Simulação 3 regista os valores de humidade relativa mais baixos de Abril a Setembro;
- A Simulação 4 regista os valores de humidade relativa mais baixos de Outubro a Março;
- Só as simulações 2B, 3 e 4 atingem valores de humidade relativa inferiores a 50% nos meses de Janeiro e Maio;
- Em nenhuma das simulações há registo da humidade relativa superior a 80%;
- A Simulação 1 apresenta os maiores valores de humidade relativa durante todo o ano;
- Entre os meses de Maio e Agosto verifica-se um paralelismo das variações de humidade em todas as simulações.

## 4.3.4. TEMPERATURA JANEIRO

Na Figura 4.4 está representada a temperatura para o mês de Janeiro.

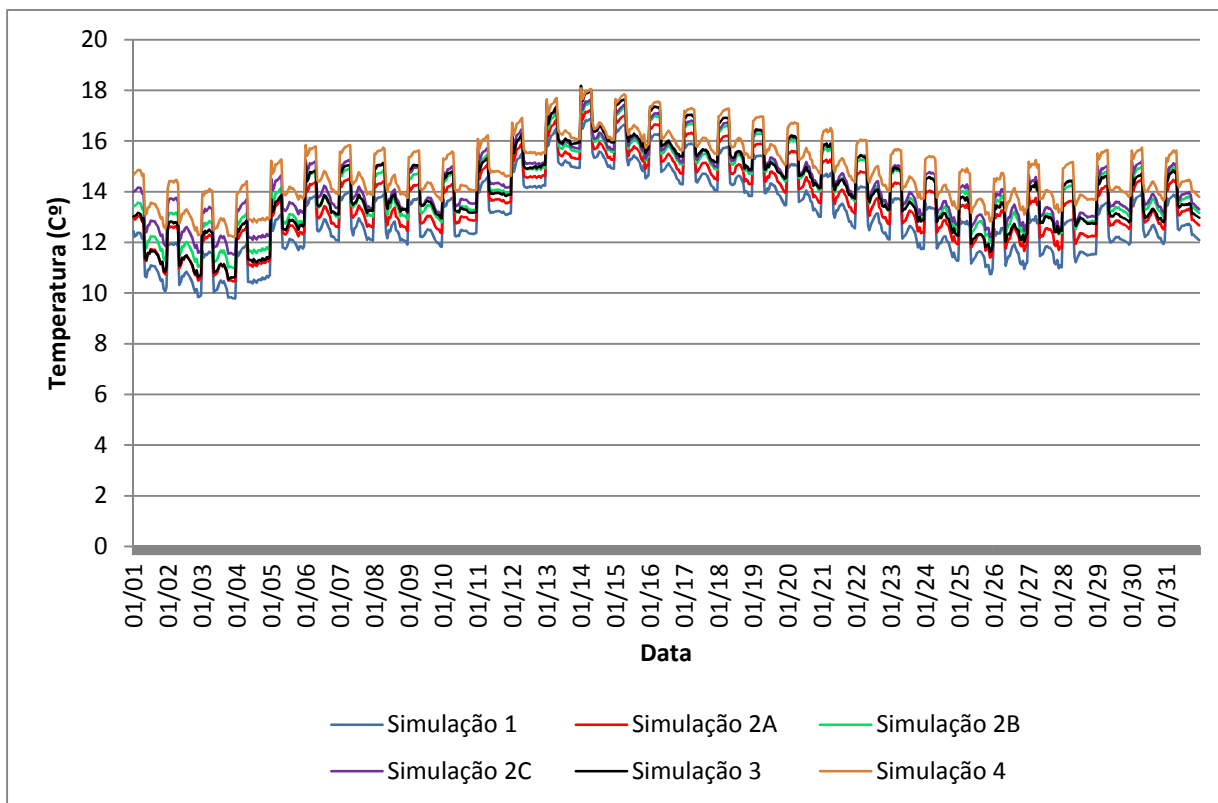


Figura 4.4 – Temperatura Zona 1 – Quarto 1 no mês de Janeiro.

Observa-se através de uma leitura mais pormenorizada as seguintes situações:

- A amplitude térmica de todas as simulações está compreendida aproximadamente entre os 10 e 18°C;
- A Simulação 4 apresenta as temperaturas mais elevadas e a Simulação 1 as temperaturas mais baixas, registando as restantes simulações valores intermédios nesse intervalo;
- Verifica-se que a Simulação 3 no início e final do mês regista as temperaturas baixas acompanhando as temperaturas da Simulação 2A e a meio do mês essas temperaturas afastam-se e aproximam-se dos valores de temperatura mais elevados;
- A Simulação 2A assim como a Simulação 1 são as que registam as menores temperaturas ao longo de todo o mês;
- A Simulação 2C tal como a Simulação 4 apresenta os valores de temperatura mais altos sendo apenas ultrapassada a meio do mês pela Simulação 3.

## 4.3.5. TEMPERATURA AGOSTO

Uma vez que se fez uma análise de pormenor do mês de Janeiro (Figura 4.4) agora será feita a mesma análise para o mês de Agosto através da Figura 4.5.

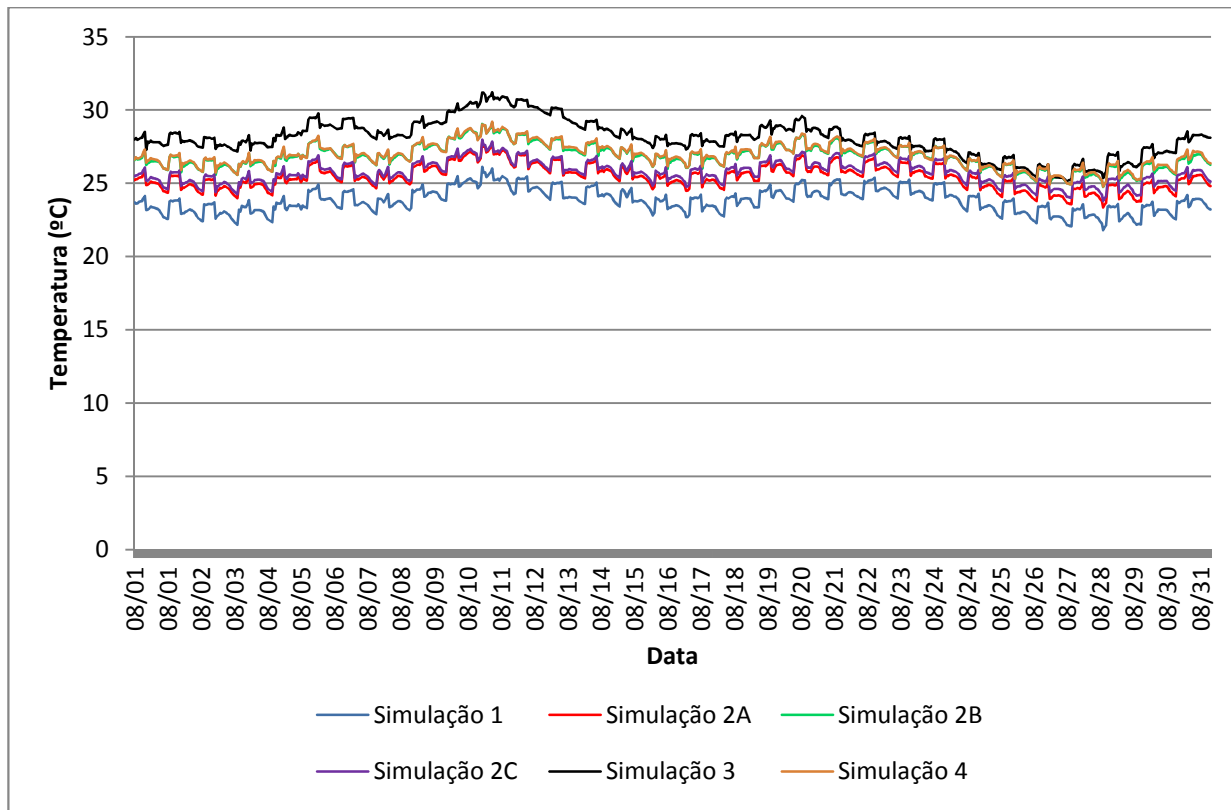


Figura 4.5 – Temperatura Zona 1 – Quarto 1 no mês de Agosto.

Assim através da Figura 4.5 destacam-se as seguintes situações:

- O intervalo de valores mínimo e máximo da temperatura está compreendido aproximadamente entre os 22 e os 32°C;
- A Simulação 1 é a que regista menores valores de temperatura estando compreendidos aproximadamente no intervalo de 22 a 26°C;
- A Simulação 3 regista os valores mais elevados de temperatura oscilando entre os 28 e os 32°C;
- Ao longo do mês as todas as simulações apresentam um comportamento muito semelhante, registando apenas no final do mês uma aproximação de temperatura da Simulação 3 às Simulações 2B e 4;
- Verifica-se que as Simulações 2A e 2C têm um comportamento paralelo praticamente coincidente ao longo do mês;
- As Simulações 2B e 4 apresentam um paralelismo no comportamento de temperatura coincidente ao longo do mês.

#### 4.4. DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA

Após a análise e apresentação dos resultados para o Quarto 1 da habitação será agora efetuada uma análise estatística do comportamento higrotérmico através da comparação do Quarto 1 e do Quarto 3.

As características relativas a ambos os quartos e que se assumiram nas simulações estão expostas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Características dos Quartos 1 e 3 utilizada nas simulações.

Zona	Compartimento	Orientação	Área (m <sup>2</sup> )	Ganhos internos
Z1	Quarto 1	Fachada Nordeste	11,18	2 pessoas
Z6	Quarto 3	Fachada Sudoeste	11.18	1 pessoa

A comparação entre estes dois compartimentos será realizada na forma estatística através da curva de frequências acumuladas da temperatura. Os resultados aqui apresentados são para o período anual e de modo mais pormenorizado para os meses de Janeiro e Agosto.

##### 4.4.1. CURVA DE FREQUÊNCIA ACUMULADA ANUAL

A Figura 4.6 representa a frequência acumulada anual para o Quarto 1.

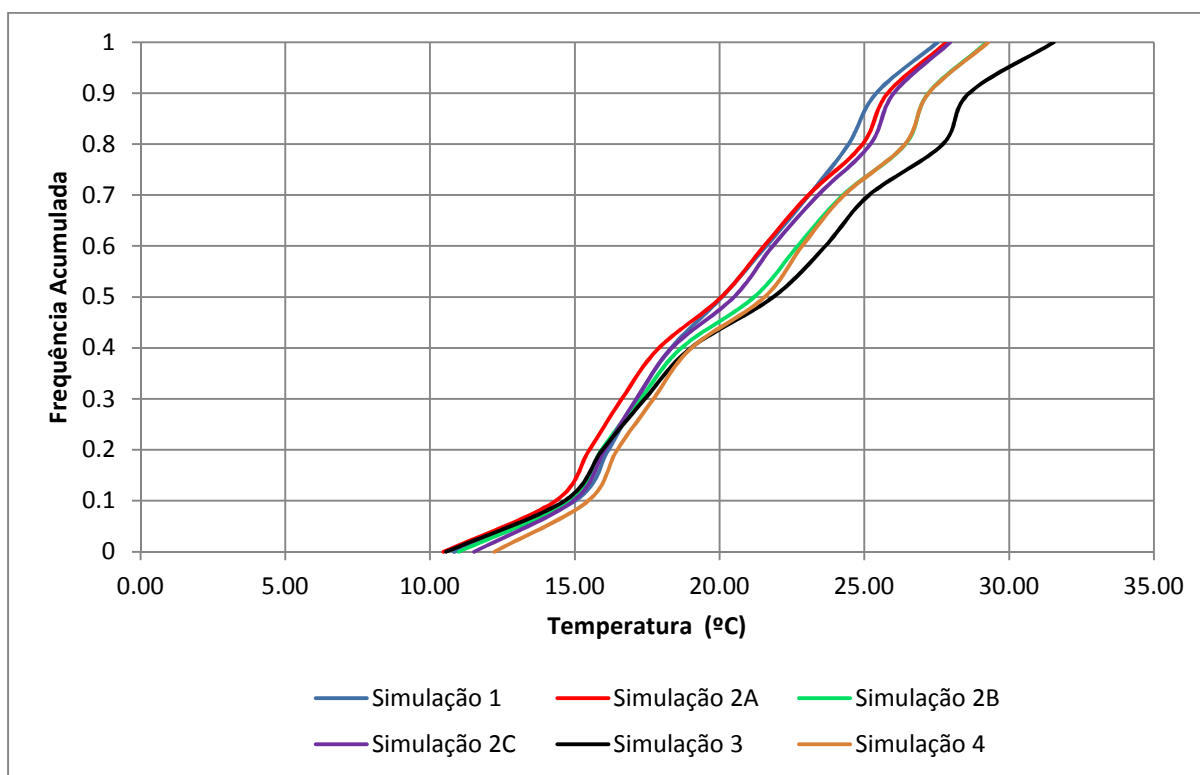


Figura 4.6 – Frequência acumulada anual para o Quarto 1.

Da análise da figura destacam-se os seguintes aspetos:

- Os valores mínimos de temperatura são relativamente próximos para todas as simulações;
- A Simulação 3 apresenta a maior flutuação de temperatura ao longo do ano;
- A Simulação 1 apresenta a menor flutuação de temperatura ao longo do ano;
- As Simulações 1 e 2A intersectam-se nas proximidades dos 50%, o que implica dizer que estatisticamente a média dos valores não se afastam muito;
- Os valores máximos de temperatura são registados para a Simulação 3 e esta afasta-se significativamente das restantes simulações;
- Os valores máximos da temperatura são coincidentes para a Simulações 2B e 4, cujas curvas se sobrepõem acima dos 25%.

A Figura 4.7 representa a frequência acumulada anual para o Quarto 3.

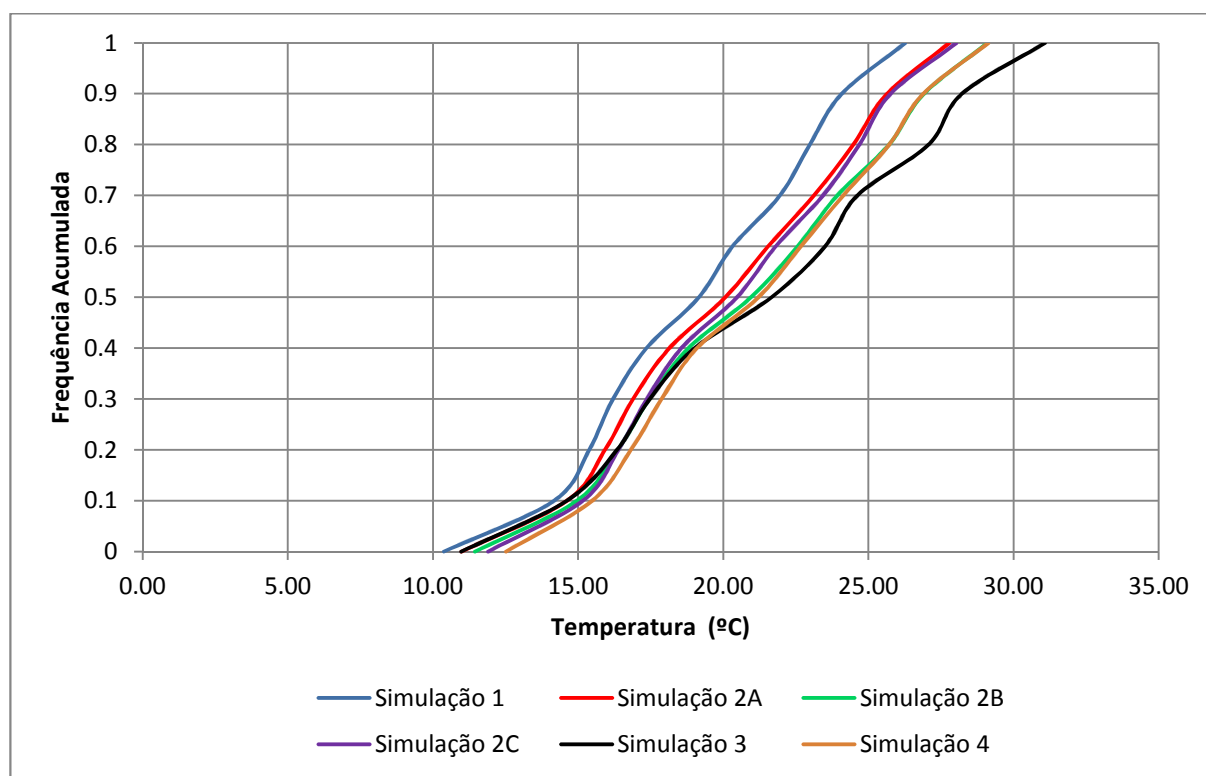


Figura 4.7 – Frequência acumulada anual para o Quarto 3.

Através da leitura da figura destacam-se os seguintes aspetos:

- Os valores mínimos de temperatura são relativamente próximos em todas as simulações;
- A Simulação 3 é a que apresenta maior flutuação de temperatura ao longo do ano;
- A interseção entre as Simulações 3 e 4 dão-se nos 41%, implica dizer que a média dos valores são próximas nas duas simulações;
- Os valores máximos de temperatura registam-se na Simulação 3;
- Os valores mínimos de temperatura registam-se na Simulação 1;
- As Simulações 2B e 4 têm as suas temperaturas máximas aproximadamente iguais;

- Verifica-se um grande afastamento nos valores máximos de temperatura, contudo, a diferença que existe entre as temperaturas máximas para todas as simulações é quase constante.

#### 4.4.2. CURVA DE FREQUÊNCIA ACUMULADA MÊS DE JANEIRO

Figura 4.8 representa a frequência acumulada no mês de Janeiro para o Quarto 1.

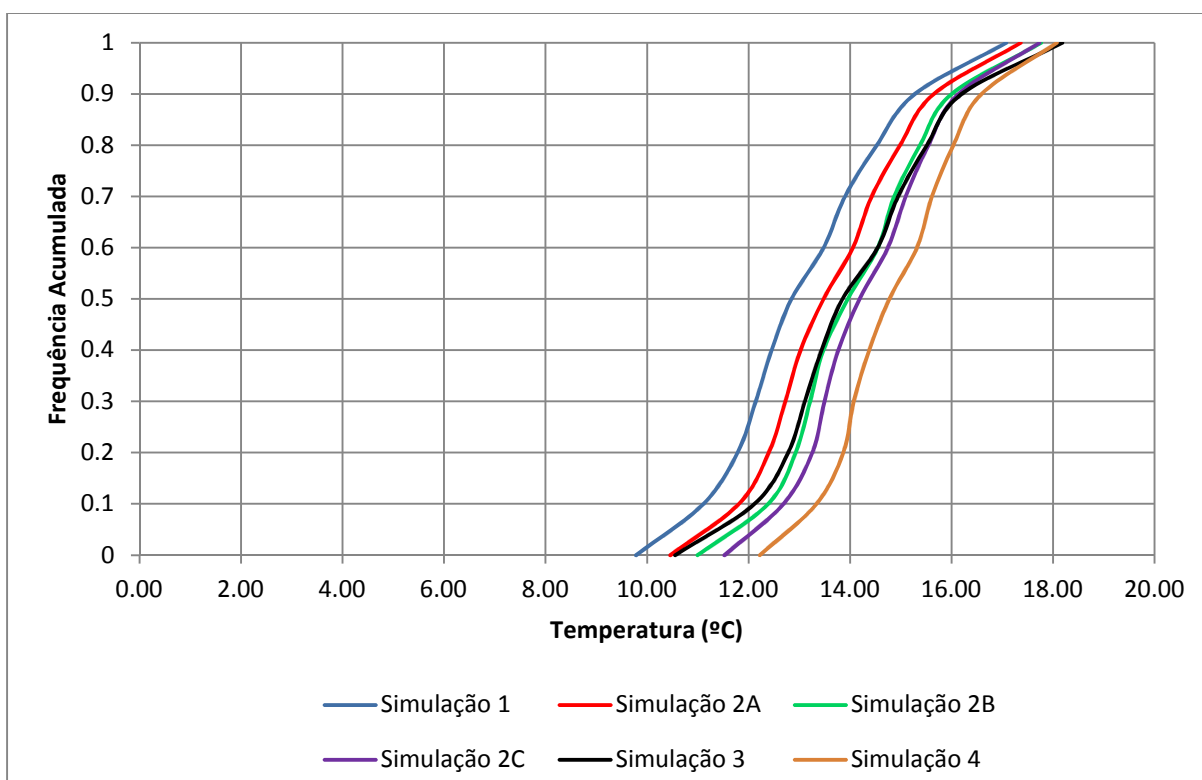


Figura 4.8 – Frequência acumulada no mês de Janeiro para o Quarto 1.

Através da figura retiram-se as seguintes observações:

- Os valores mínimos de temperatura encontram-se muito afastados, apenas as Simulações 2A e 3 tem temperaturas mínimas muito próximas;
- As Simulações 2B e 3 têm uma evolução idêntica havendo um afastamento nas temperaturas máximas com um registo superior para a Simulação 3, a média de valores entre estas duas simulações são idênticas;
- Os valores máximos são muito próximos para todas as simulações;
- A Simulação 3 é a que apresenta maior flutuação nos valores de temperatura.

A Figura 4.9 apresenta a frequência acumulada no mês de Janeiro para o Quarto 3.

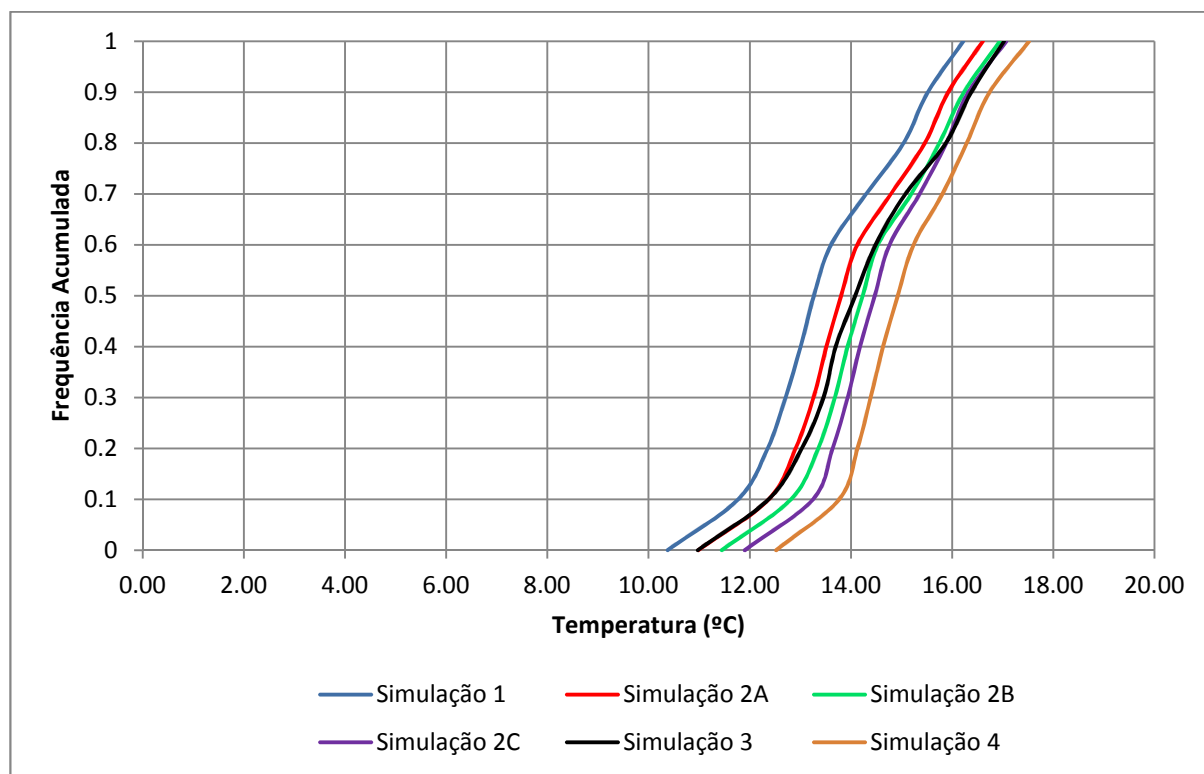


Figura 4.9 – Frequência acumulada no mês de Janeiro para o Quarto 3.

Através desta figura observam-se as seguintes situações:

- O valor mínimo de temperatura é o mesmo para as Simulações 2A e 3;
- A Simulação 3 intersesta a Simulação 2B aproximadamente nos 58%, o que implica que os valores médios são muito semelhantes;
- À exceção da Simulação 3 todas as outras apresentam uma variação semelhante entre si;
- Os valores máximos de temperatura das várias simulações são próximos entre si;
- A Simulação 3 apresenta a maior flutuação de temperatura.



## 4.4.3. CURVA DE FREQUÊNCIA ACUMULADA MÊS DE AGOSTO

A Figura 4.10 representa a curva de frequências acumuladas no mês de Agosto para o Quarto 1.

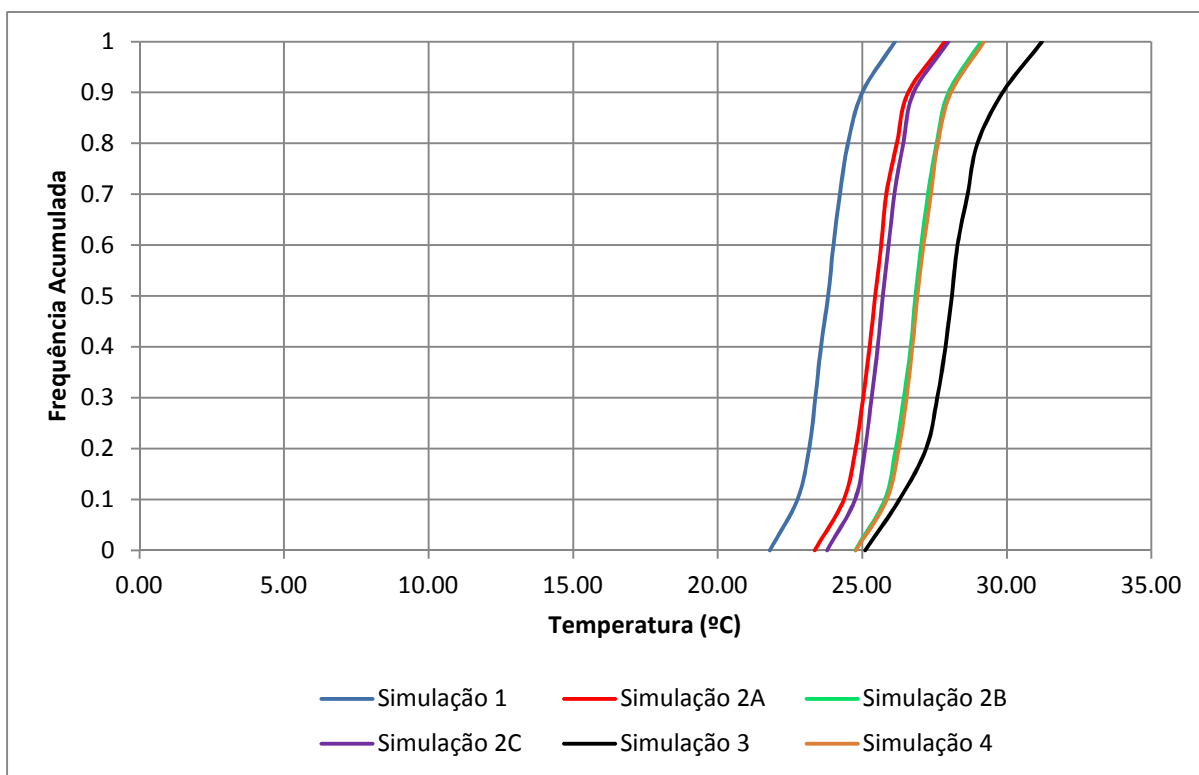


Figura 4.10 – Frequência acumulada no mês de Agosto para o Quarto 1.

Através desta figura destacam-se as seguintes situações:

- Os valores mínimos de temperatura são próximos nas Simulações 2B, 3 e 4;
- Não existem grandes flutuações de temperatura nas simulações em causa;
- As Simulações 2B e 4 apresentam uma curva de valores acumulados com um comportamento idêntico e coincidente, as suas temperaturas mínimas e máximas são praticamente iguais;
- As Simulações 2A e 2C têm uma curva de valores com um crescimento semelhante sendo que os valores máximos são praticamente iguais;
- A curva de valores de temperatura da Simulação 1 é a que regista temperaturas mais baixas;
- A curva de valores de temperatura da Simulação 3 é a que regista temperaturas mais elevadas.

A Figura 4.11 representa a curva de frequências acumuladas no mês de Agosto para o Quarto 3.

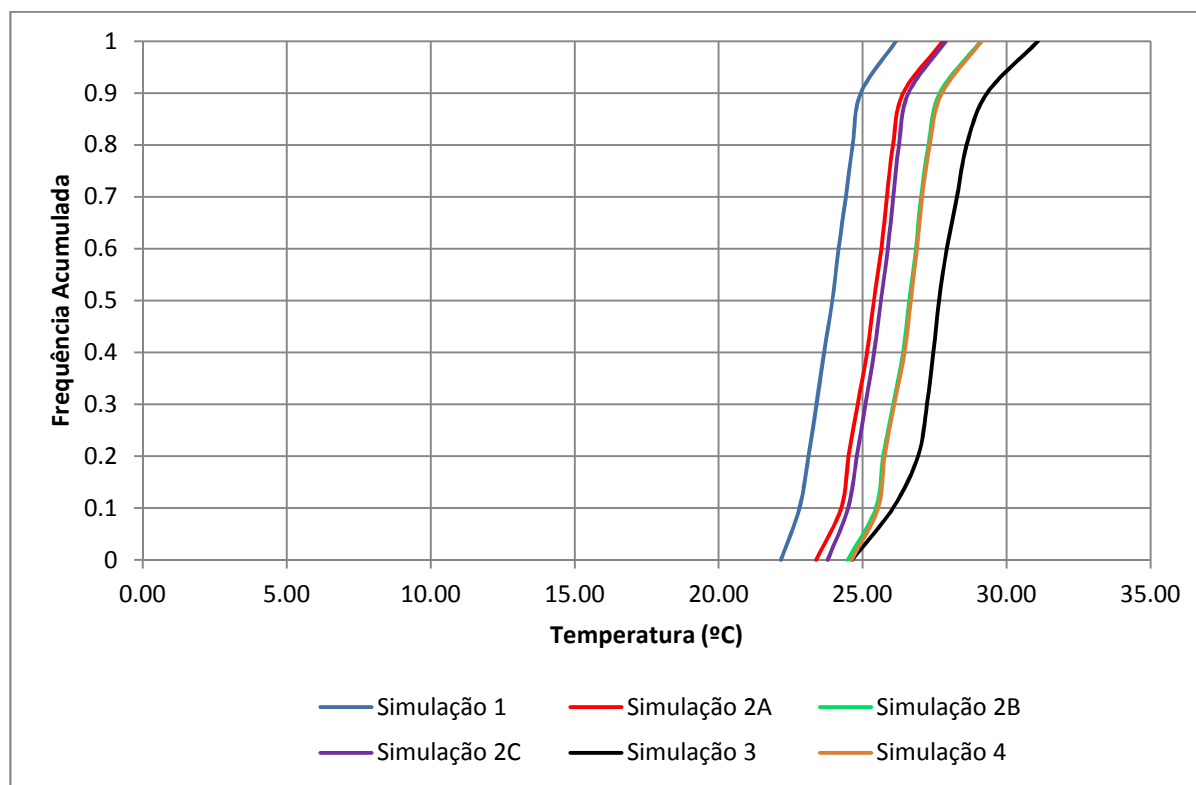


Figura 4.11 – Frequência acumulada no mês de Agosto para o Quarto 3.

Através da observação da figura destacam-se seguintes situações:

- Os valores de temperatura mínimos são muito próximos nas Simulações 2A e 2C;
- Nas Simulações 2B, 4 e 3 as temperaturas mínimas são praticamente iguais;
- Não se verifica para nenhuma das simulações grandes flutuações da temperatura;
- A Simulação 1 tem os valores de temperatura mais baixos;
- A Simulação 3 tem os valores de temperatura mais altos;
- Os valores de temperatura das Simulações 2B e 4 tem comportamentos de crescimento idênticos e as suas curvas são praticamente coincidentes;
- As Simulações 2A e 2C têm um comportamento de crescimento idêntico sendo que nos valores máximos estas apresentem valores quase iguais
- Os valores de temperatura máximos são muito afastados entre si exceto nas Simulações 2A e 2C em que são praticamente iguais, o mesmo ocorrendo com as Simulações 2B e 4.

Nas Tabelas seguintes (4.5 e 4.6) apresentam-se os valores de referência da curva de frequência acumulada que se obteve através das simulações às zonas Z1 e Z6 da habitação modelo e que representam os Quartos 1 e 3 respetivamente.

Tabela 4.5 – Valores de referência da curva de frequência acumulada para o Quarto 1.

Percentis		Simulação					
		1	2A	2B	2C	3	4
Anual	$\Theta_{90}$	25.41	25.81	27.21	26.02	28.61	27.22
	$\Theta_{\text{médio}}$	19.96	19.82	20.79	20.27	21.46	21.14
	$\Theta_{10}$	15.00	14.33	14.80	14.95	14.64	15.46
Janeiro	$\Theta_{90}$	15.28	15.65	15.99	16.13	16.19	16.59
	$\Theta_{\text{médio}}$	13.13	13.67	14.13	14.37	14.11	14.93
	$\Theta_{10}$	11.11	11.81	12.39	12.39	12.12	13.33
Agosto	$\Theta_{90}$	25.00	26.58	27.98	26.76	29.85	28.06
	$\Theta_{\text{médio}}$	23.85	25.48	26.87	25.75	28.10	26.94
	$\Theta_{10}$	22.76	24.36	25.78	24.75	26.28	25.84

Tabela 4.6 – Valores de referência da curva de frequência acumulada para o Quarto 3.

Percentis		Simulação					
		1	2A	2B	2C	3	4
Anual	$\Theta_{90}$	24.08	25.64	26.91	25.76	28.22	26.89
	$\Theta_{\text{médio}}$	18.93	19.92	20.74	20.32	21.32	21.05
	$\Theta_{10}$	14.17	14.61	14.95	15.16	14.61	15.48
Janeiro	$\Theta_{90}$	15.52	15.92	16.23	16.32	16.38	16.74
	$\Theta_{\text{médio}}$	13.47	13.98	14.37	14.61	14.22	15.09
	$\Theta_{10}$	11.77	12.37	12.81	12.81	12.37	13.77
Agosto	$\Theta_{90}$	24.93	26.40	27.67	26.58	29.32	27.75
	$\Theta_{\text{médio}}$	23.94	25.38	26.60	25.62	27.74	26.66
	$\Theta_{10}$	22.80	24.26	25.46	24.50	26.05	25.53

#### 4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a apresentação dos resultados obtidos para os Quartos 1 e 3 através das curvas de frequência acumulada anual, do mês de Janeiro e Agosto, é pertinente fazer uma análise que nos permita relacionar estas duas zonas da habitação, sendo que uma se encontra orientada a Nordeste, Quarto 1, e a outra a Sudoeste, Quarto 3.

Relativamente às curvas de frequência anual nos dois Quartos verifica-se que existem algumas diferenças nos resultados das simulações.

Com base nas Figuras 4.6 e 4.7 e nas Tabelas 4.5 e 4.6, analisando o comportamento anual das frequências destacam-se as seguintes conclusões:

- Os comportamentos das simulações são muito semelhantes, contudo pode-se verificar que existe uma maior proximidade dos valores da temperatura no Quarto 1;
- Verifica-se que as flutuações de temperatura entre os valores mínimos e máximos são maiores no Quarto 1;
- Nas Simulações 3 e 4 verifica-se que as temperaturas mínimas nos dois Quartos são muito idênticas mas relativamente às temperaturas máximas já se verifica uma variação;

Das curvas de frequência dos meses de Janeiro e Agosto, que correspondem ao mês mais frio e ao mês mais quente, faz-se uma análise com mais pormenor dos resultados obtidos.

Através das Figuras 4.8 e 4.9, que se referem ao mês Janeiro, e das Tabelas 4.5 e 4.6 destacam-se as seguintes conclusões:

- As curvas das Simulações 2B e 3 são praticamente sobrepostas no Quarto 1;
- As flutuações entre as temperaturas mínimas e máximas são maiores para o Quarto 1;
- As temperaturas mínimas e máximas para o mês de Janeiro em todas as simulações são superiores no Quarto 3;

Do mesmo modo, e utilizando agora as Figuras 4.10 e 4.11 e as Tabela 4.5 e 4.6, que correspondem ao valor da frequência acumulada do mês de Agosto, destacam-se as seguintes conclusões:

- O comportamento das curvas de frequência é praticamente igual nos dois Quartos;
- As flutuações de temperatura são semelhantes em todas as simulações à exceção da Simulação 3 a qual regista valores de temperatura superiores no Quarto 1;
- As curvas de Simulações 2B e 4 são coincidentes nos dois Quartos.

Como em cima já foi referido, não é desprezável a orientação geográfica dos referidos Quartos bem como o número de ocupantes de cada Quarto pois estes fatores têm necessariamente influência nos resultados finais.

As análises que de seguida se iram efetuar são relativas aos cenários de simulação que apresentam características de semelhança e que podem ser de certa forma comparáveis entre si.

No primeiro caso analisa-se o comportamento que o efeito da radiação provoca no Quarto 1. Neste caso as simulações analisadas são as Simulações 1, 2A, 2B e 4 onde na Simulação 1 não há exposição solar, na Simulação 2A e 2B os coeficientes de absorção solar são de 0,4 e 0,8 respetivamente e a Simulação 4 tem uma cobertura jardim exposta ao sol. Em todas estas simulações a camada de isolamento manteve-se igual.

Das curvas de frequência do mês de Janeiro e Agosto, Figura 4.8 e 4.10, apresentam-se as seguintes conclusões para o Quarto 1:

- A Simulação 1 por não estar exposta diretamente à radiação solar apresenta as temperaturas mais baixas para os meses de Janeiro e Agosto. Esta simulação é a que apresenta maior flutuação nos valores de temperatura, ou seja a vulnerabilidade às variações climáticas é maior;
- No caso das Simulações 2A e 2B verifica-se que com exposição direta à radiação solar o coeficiente de absorção solar é determinante nos benefícios internos do controle da temperatura no mês de Janeiro.
- Na Simulação 4, onde se introduziu a cobertura jardim, verifica-se que para o mês de Janeiro esta solução apresenta melhores benefícios internos. No mês de Agosto o comportamento desta simulação é semelhante ao da Simulação 2B.

Agora analisa-se o efeito que a camada de isolamento provoca no desempenho térmico interior do Quarto 1. Esta análise será realizada comparando um conjunto de simulações, Simulação 2A com a 2C e a Simulação 3 com a 4. No caso das Simulações 2A e 2C manteve-se constante o coeficiente de absorção solar e variou-se a espessura da camada de isolamento. Relativamente às Simulações 3 e 4, coberturas jardim, é introduzida uma camada de isolamento na Simulação 4.

Das curvas de frequência do mês de Janeiro e Agosto, Figura 4.8 e 4.10, apresentam-se as seguintes conclusões para o Quarto 1:

- No primeiro conjunto de Simulações, 2A e 2C, verifica-se que o aumento da espessura da camada de isolamento tem maiores benefícios internos de temperatura no mês de Janeiro quando as temperaturas exteriores são mais baixas. No mês de Agosto este efeito da camada de isolamento já não se evidencia da mesma forma;
- Relativamente ao conjunto de Simulações 3 e 4 verifica-se que o efeito da camada de isolamento tem benefícios mais significativos tanto no mês de Janeiro como no mês de Agosto. No mês de Janeiro as vantagens são maiores na Simulação 4 isto porque o isolamento permite ter menores flutuações de temperatura e aumenta os ganhos térmicos no interior do compartimento. No caso do mês de Agosto é a Simulação 3 que atinge temperaturas superiores, então verifica-se que com a introdução camada de isolamento, Simulação 4, vai ser possível controlar de forma benéfica as temperaturas no interior do compartimento.

Por último refere-se o efeito que a orientação geográfica pode ter no desempenho do comportamento térmico no interior de um edifício. Assim relacionam-se de uma forma geral os Quartos 1 e 3, correspondentes às Zonas 1 e 6 do apartamento, onde o Quarto 1 tem a sua orientação a Nordeste e o Quarto 3 está orientado a Sudoeste.

Para se compreender o efeito da orientação geográfica recorreu-se a nova simulação que se designou de Simulação 1A. Nesta simulação retirou-se a chapa em sandwich e o isolamento que constituíam a cobertura e admitiu-se que esta está com uma exposição solar direta.

A Tabela 4.7 apresenta os resultados dessa nova simulação para os Quartos 1 e 3.

Tabela 4.7 – Resultados das frequências acumuladas da Simulação 1A para Quarto 1.

Percentis		Simulação 1A	
		Quarto 1	Quarto 3
Anual	$\Theta_{90}$	29.63	29.10
	$\Theta_{\text{médio}}$	20.88	20.72
	$\Theta_{10}$	12.68	12.87
Janeiro	$\Theta_{90}$	14.84	14.92
	$\Theta_{\text{médio}}$	12.09	12.26
	$\Theta_{10}$	9.31	9.67
Agosto	$\Theta_{90}$	30.94	30.57
	$\Theta_{\text{médio}}$	28.75	28.30
	$\Theta_{10}$	26.53	26.14

Analisando a Tabela 4.7 pode-se inferir que no mês de Janeiro como seria expectável as temperaturas no Quarto 3, com orientação a Sudoeste, registam valores ligeiramente superiores às do Quarto 1 já que beneficiam de uma maior exposição solar ao longo do dia. Da mesma forma seria expectável que no mês de Agosto as temperaturas no Quarto 3 fossem superiores já que a exposição solar é maior, no entanto tal não se verifica.

O ganho térmico resultante da presença de duas pessoas no Quarto 1 e uma pessoa no Quarto 3 poderá ter influência significativa que contribua para que no Quarto 1 as temperaturas sejam superiores às do Quarto 3 no mês de Agosto.

Podendo-se assim concluir que a influência nos ganhos térmicos dos Quartos através dos fatores orientação geográfica e número de ocupantes do compartimento inverte-se ao longo do ano, isto é, em Janeiro a exposição solar tem uma influência mais significativa do que o número de ocupantes, situação que se inverte no mês de Agosto, pelo que se deve estudar a influência das horas de exposição solar consoante a orientação geográfica e o horário de ocupação dos compartimentos.

Depois de referenciados alguns dos aspetos que se mostram mais importantes na análise do comportamento térmico dos dois Quartos, serão seguidamente discutidos com mais relevância os casos das Simulações 3 e 4 por estas apresentarem o comportamento higrotérmico das coberturas jardim nos meses em que as temperaturas exteriores atingem valores extremos.

#### 4.6. COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

Uma vez que as coberturas jardim são uma aposta de mercado relativamente recente, já começam a existir estudos mais aprofundados sobre as possíveis vantagens que este tipo de cobertura possa proporcionar aos edifícios quer ao nível da componente térmica quer ao nível do seu desempenho energético.

O estudo efetuado na área do grande Porto, situado à latitude de 41°N, sob a ação de um clima temperado de forte influência marítima, pretende contribuir para um melhor conhecimento do efeito que a implementação das coberturas jardim poderá originar no comportamento térmico interior dos edifícios e consequente rendimento energético em zonas climaticamente semelhantes.

De forma a entender o comportamento que o efeito da cobertura jardim pode proporcionar, fez-se uma nova simulação. Essa simulação, denominada de Simulação 1A, pretende uniformizar ainda mais as condições de simulação, assim como obter resultados mais esclarecedores.

A grande diferença entre a Simulação 1 e a Simulação 1A reside no facto de se ter retirado o telhado em chapa sandwich assim como o isolamento que lhe estava associado, sujeitando a cobertura a uma exposição solar direta. A Tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos das Simulações 1A, 3 e 4 para o Quarto 1.

Tabela 4.8 – Resultado das frequências acumuladas para Quarto 1.

Percentis		Simulação		
		1A	3	4
Anual	Θ90	29.63	28.61	27.22
	Θmédio	20.88	21.46	21.14
	Θ10	12.68	14.64	15.46
Janeiro	Θ90	14.84	16.19	16.59
	Θmédio	12.09	14.11	14.93
	Θ10	9.31	12.12	13.33
Agosto	Θ90	30.94	29.85	28.06
	Θmédio	28.75	28.10	26.94
	Θ10	26.53	26.28	25.84

Como foi referido no início, alguns estudos já tem vindo a ser realizados tendo como finalidade conhecer o comportamento das coberturas jardim nos edifícios. Uma referência a ter em conta são os artigos [37], [47] e [48] de autoria de Santamouris.

De acordo com esses artigos, que se basearam em simulações e recolha de dados de edifícios localizados em Atenas, à latitude de 38°N sob a ação do clima Mediterrâneo, os resultados obtidos mostram que o efeito da implementação de coberturas jardim leva a que no inverno, quando as temperaturas exteriores são mais baixas, a cobertura jardim contribua para a regulação da temperatura interior do edifício promovendo o acréscimo da temperatura interna. Por outro lado, no verão, quando as temperaturas exteriores são mais elevadas, os resultados mostram que a cobertura jardim contribui para uma regulação da temperatura interior do edifício promovendo um decréscimo da temperatura interna.

Nos artigos referidos, Santamouris estima que a eficácia do saldo térmico para o inverno seja de aproximadamente de 0,6°C e no verão possa atingir aproximadamente os 0,4°C. Apesar de a localização e o ambiente de obtenção dos dados seja diferente do que neste trabalho é apresentado, pode-se fazer uma comparação com os resultados apresentados na Tabela 4.8 que resultam das Simulações 1A, 3 e 4.

Através da Tabela 4.8 e numa primeira análise efetuou-se a comparação das temperaturas interiores respetivas das Simulações 1A e 3, por serem os casos onde a discussão de resultados pode ser feita de forma direta.

Observando a tabela verifica-se que a implementação da cobertura jardim, no mês de Janeiro, quando a temperatura exterior é mais baixa, induz o aumento da temperatura interna no edifício com ganhos de conforto térmico assinaláveis. No mês de Agosto, quando a temperatura exterior atinge os maiores valores, verifica-se o efeito contrário, ou seja, as temperaturas interiores sofrem decréscimo por efeito da cobertura jardim.

As vantagens verificadas em ambos os casos assumem valores entre 1,2°C e 0,8°C para os meses de Janeiro e Agosto respetivamente.

Pode-se concluir que há uma concordância entre os resultados que se obtiveram através das Simulações realizadas neste trabalho e os resultados espectáveis que Santamouris explana nos artigos [47], [48] e [49].

Por fim, e depois de numa primeira análise já se ter comprovado através da Simulação 3 que as coberturas jardim proporcionam vantagens de carácter térmico e energético far-se-á agora a relação com a Simulação 4.

A Simulação 4, também com cobertura jardim, distingue-se da Simulação 3 pelo facto de se ter introduzido uma camada de isolamento a separar o substrato de solo da estrutura de betão do edifício. O isolamento permite controlar o fluxo térmico, reduzindo os saldos térmicos entre o interior e o exterior do edifício, diminuindo as flutuações de temperatura no interior.

Assim, através da Tabela 4.8 verifica-se que a Simulação 4 comparativamente à Simulação 3 apresenta melhores desempenhos térmicos, isto é, no mês de Janeiro as temperaturas internas são superiores e no mês de Agosto as temperaturas internas são mais baixas. Com estes resultados é possível concluir que apesar da cobertura jardim só por si apresentar vantagens a introdução de uma camada de isolamento leva ainda a resultados mais vantajosos para o desempenho do edifício.



## 5

## ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

## 5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a análise de sensibilidade dos parâmetros de cálculo das coberturas jardim, objetivo principal desta dissertação.

A análise referida foi efetuada tendo por base as simulações que atrás foram descritas como Simulação 3 e 4 por serem as únicas que simulavam o efeito da cobertura jardim na habitação. É importante referir que nesta análise o que se fez variar foram os parâmetros relativos à cobertura jardim, que se tem que introduzir no programa EnergyPlus, enquanto as restantes condições de simulação como o isolamento, a taxa de renovação do ar e os ganhos internos, etc., foram mantidos exatamente iguais ao que já tinha sido referido.

Fez-se variar cada parâmetro entre os seus valores limites, máximos e mínimos, definidos pelo programa. Desta forma foi-se variando os valores limite de cada um dos parâmetros mantendo os restantes os seus valores de referência.

Assim, através da análise de sensibilidade de cada parâmetro é possível identificar quais os parâmetros que mais influenciam o comportamento térmico na habitação, nos meses que registam as temperaturas mais extremas, Janeiro e Agosto.

## 5.2. ÍNDICE DE SENSIBILIDADE

As simulações foram realizadas através da variação dos dezasseis parâmetros que integram o campo relativo à cobertura jardim no EnergyPlus. Desta forma foram realizadas 33 simulações para cada cenário de simulação perfazendo um total de 66 simulações. Como a cobertura jardim se caracteriza por uma camada de vegetação e outra de substrato de solo, podemos então atribuir cada parâmetro à camada em que este vai ter influência, Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 – Parâmetros de caracterização das plantas.

Parâmetros associados às plantas
Altura das Plantas
Índice de área foliar
Refletividade das folhas
Emissividade das folhas
Resistência estomática mínima

Tabela 5.2 – Parâmetros de caracterização do solo.

Parâmetros associados ao solo
Rugosidade
Espessura
Condutibilidade do solo seco
Massa volúmica do solo seco
Calor específico do solo seco
Absortância térmica
Absortância solar
Absortância visível
Teor de humidade de saturação volumétrica da camada de solo
Teor de humidade residual do volume da camada de solo
Teor de humidade volumétrica inicial da camada de solo

A análise de sensibilidade é necessária de modo a determinar e compreender qual ou quais os parâmetros que se assumem de carácter mais importante quando se está a dimensionar uma cobertura jardim.

O método utilizado na análise para determinar a influência de um determinado parâmetro no resultado final foi um método simples designado de índice de sensibilidade (SI). Este método utiliza uma fórmula que é definida através da equação (5.1), [50]:

$$SI = \frac{D_{m\acute{a}x} - D_{m\acute{i}n}}{D_{m\acute{a}x}} \quad (5.1)$$

Onde,

$D_{m\acute{a}x}$  – Corresponde ao maior valor dos percentis de referência ( $\Theta_{10}$ ,  $\Theta_{m\acute{e}d\acute{i}o}$  e  $\Theta_{90}$ ) que se obtém através das simulações com os valores limite de cada parâmetro;

$D_{m\acute{i}n}$  – Corresponde ao menor valor dos percentis de referência ( $\Theta_{10}$ ,  $\Theta_{m\acute{e}d\acute{i}o}$  e  $\Theta_{90}$ ) que se obtém através das simulações com os valores limite de cada parâmetro.

Na página seguinte, a Tabela 5.3 apresenta os parâmetros de cálculo das coberturas jardim, assim como os intervalos de valores e os valores de referência respetivos de cada parâmetro. Como a análise de sensibilidade é realizada para as Simulações 3 e 4, então apresenta-se uma única tabela que serviu de ponto de partida para as duas simulações.

Tabela 5.3 – Intervalo de valores e valores de referência dos parâmetros.

Parâmetros		Unidades	Mínimo	Referência	Máximo
-	Nome	-	Green Roof		
P1	Altura das Plantas	(m)	]0.005	0.2	1]
P2	Índice de área foliar	(-)	]0.001	1	5]
P3	Refletividade da folha	(-)	[0.05	0.22	0.5]
P4	Emissividade da folha	(-)	[0.8	0.95	1]
P5	Resistência estomática mínima	(s/m)	[50	180	300]
-	Nome camada de solo		Green Roof Soil		
P6	Rugosidade	(-)	VerySmooth	MediumRough	VeryRough
P7	Espessura	(m)	]0.05	0.1	0.7]
P8	Condutibilidade do solo seco	(W/mK)	[0.2	0.35	1.5]
P9	Massa volúmica do solo seco	(kg/m <sup>3</sup> )	[300	1100	2000]
P10	Calor específico do solo seco	(J/kgK)	]500	1200	2000]
P11	Absortância térmica	(-)	]0.8	0.9	1]
P12	Absortância solar	(-)	[0.4	0.7	0.9]
P13	Absortância visível	(-)	]0.5	0.75	1]
P14	Teor de humidade de saturação volumétrica da camada de solo	(-)	]0.1	0.3	0.5]
P15	Teor de humidade residual do volume da camada de solo	(-)	[0.01	0.01	0.1]
P16	Teor de humidade volumétrica inicial da camada de solo	(-)	]0.05	0.1	0.5]

### 5.2.1. SIMULAÇÃO 3 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Como foi anteriormente referido (§4.2.3) a Simulação 3 apresenta como característica a implementação de uma cobertura jardim sobre a laje de betão sem que exista algum tipo de isolamento entre eles.

A Figura 5.1 representa os resultados obtidos através da análise de sensibilidade para os dezasseis parâmetros da Simulação 3.

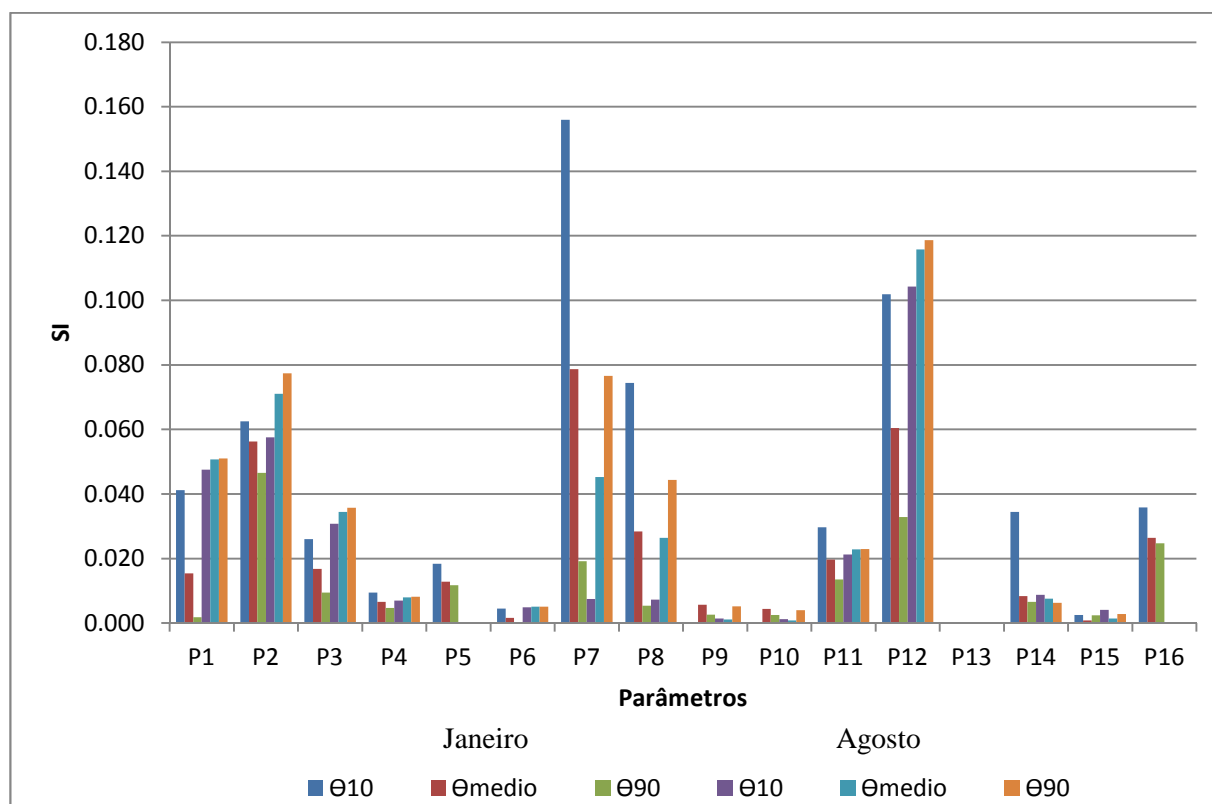


Figura 5.1 – Índice de sensibilidade dos parâmetros da Simulação 3.

Em seguida, será realizada uma observação do que cada parâmetro representa através dos resultados obtidos e posteriormente será efetuada uma análise conjunta relativa aos parâmetros mais significativos que poderão otimizar o funcionamento da cobertura jardim.

#### 5.2.1.1 Parâmetro 1 – Altura das Plantas

- A altura das plantas tem alguma influência nas temperaturas mínimas no mês de Janeiro;
- A altura das plantas no mês de Agosto influencia de forma considerável as temperaturas mínimas, médias e máximas.

#### 5.2.1.2 Parâmetro 2 – Índice de área foliar

- No mês de Janeiro verifica-se que este parâmetro tem muita importância para as temperaturas mínimas, médias e máximas, pelo que se observa é nas temperaturas mínimas que este se destaca mais;

- Ao contrário do que se observa para o mês de Janeiro, no mês de Agosto este parâmetro também se mostra de grande importância contudo é nas temperaturas mais elevadas que este exerce maior influência.

#### 5.2.1.3 Parâmetro 3 – Refletividade da Folha

- Para o mês de Janeiro verifica-se que este parâmetro influencia mais nas temperaturas mínimas;
- Relativamente ao mês de Agosto há uma influência considerável deste parâmetro nas temperaturas mínimas, médias e máximas.

#### 5.2.1.4 Parâmetro 4 – Emissividade da Folha

- Não é um parâmetro que vá ter muita influência porém é nas temperaturas mínimas no mês de Janeiro que há um pequeno destaque;
- Relativamente ao mês de Agosto destaca-se o fato de a influência do parâmetro se fazer notar de forma muito aproximada para as temperaturas mínimas, médias e máximas.

#### 5.2.1.5 Parâmetro 5 – Resistência Estomática Mínima

- O maior destaque verifica-se para os valores mínimos da temperatura no mês de Janeiro;
- Este parâmetro no mês de Agosto não tem qualquer influência nas temperaturas.

#### 5.2.1.6 Parâmetro 6 – Rugosidade

- Tem uma influência insignificante nas temperaturas do mês de Janeiro, destaque apenas para as temperaturas mínimas;
- Também no mês de Agosto este parâmetro tem pouca influência contudo influência de modo semelhante as temperaturas mínimas, médias e máximas.

#### 5.2.1.7 Parâmetro 7 – Espessura

- Este parâmetro tem bastante influência nas temperaturas mínimas e médias no mês de Janeiro, mas mesmo assim o maior destaque verifica-se nas mínimas;
- No mês de Agosto este parâmetro tem grande influência nas temperaturas médias e máximas.

#### 5.2.1.8 Parâmetro 8 – Condutibilidade do Solo Seco

- Verifica-se que este parâmetro tem grande influência nas temperaturas mínimas no mês de Janeiro;
- A maior influência deste parâmetro é relativo às temperaturas máximas no mês de Agosto.

#### 5.2.1.9 Parâmetro 9 – Massa Volúmica do Solo Seco

- Não se verifica uma influência significativa deste parâmetro nas temperaturas no mês de Janeiro;
- Da mesma forma, no mês de Agosto este parâmetro não mostra influência no comportamento das temperaturas.

#### 5.2.1.10 Parâmetro 10 – Calor Específico do Solo Seco

- Não há registo de influência significativa da temperatura no mês de Janeiro;
- Tal como acontece em Janeiro este parâmetro não mostra influência significativa para o mês de Agosto.

#### 5.2.1.11 Parâmetro 11 – Absortância Térmica

- Verifica-se que este parâmetro tem maior influência nas temperaturas mínimas no mês de Janeiro;
- No mês de Agosto a influência verifica-se de igual modo para as temperaturas mínimas, médias e máximas.

#### 5.2.1.12 Parâmetro 12 – Absortância Solar

- No mês de Janeiro verifica-se que há uma influência muito significativa nas temperaturas mínimas e médias;
- Relativamente ao mês de Agosto é aqui que este parâmetro regista influência muito significativa no comportamento das temperaturas mínimas, médias e máximas.

#### 5.2.1.13 Parâmetro 13 – Absortância Visível

- Este parâmetro não foi avaliado.

#### 5.2.1.14 Parâmetro 14 – Teor de Humidade de Saturação Volumétrica da Camada de Solo

- É na temperatura mínima no mês de Janeiro que este parâmetro regista a sua influência mais significativa;
- No mês de Agosto este parâmetro não regista uma influência significativa no comportamento da temperatura.

#### 5.2.1.15 Parâmetro 15 – Teor de Humidade Residual do Volume da Camada de Solo

- O registo do comportamento de temperatura no mês de Janeiro não apresenta uma influência significativa deste parâmetro;
- Em Agosto este parâmetro também não regista influência significativa no comportamento das temperaturas.

## 5.2.1.16 Parâmetro 16 – Teor de Umidade Volumétrica Inicial da Camada de Solo

- A influência deste parâmetro verifica-se no comportamento das temperaturas mínima, médias e máximas, sendo a influência mais significativa nas temperaturas mínimas no mês de Janeiro
- No mês de Agosto não há qualquer registo de influência deste parâmetro no comportamento das temperaturas.

Pela análise conjunta de todos os parâmetros que influenciam o comportamento da cobertura jardim podemos referenciar os que maior destaque mostram no comportamento da temperatura do Quarto 1.

Através da Figura 5.1 verifica-se que os parâmetros que maior influência e importância tem na escolha de uma cobertura jardim e que consequentemente vão ter no comportamento da temperatura são, por ordem decrescente de influência numa primeira análise, os parâmetros 7, 12, 2, 1, 8, 3 e 11 que correspondem à espessura da camada de solo, à absorvência solar, ao índice de área foliar, à altura das plantas, à condutibilidade do solo seco, à refletividade das folhas e à absorvência térmica.

Nas Tabelas 5.4 e 5.5 são apresentados os parâmetros mais significativos para a escolha da vegetação e da camada de solo.

Tabela 5.4 – Parâmetros mais relevantes na escolha da vegetação.

Parâmetros – Vegetação	
P1	Altura das Plantas
P2	Índice de Área Foliar
P3	Refletividade das Folhas

Tabela 5.5 – Parâmetros mais relevantes na escolha do solo.

Parâmetros – Solo	
P7	Espessura
P8	Condutibilidade do Solo Seco
P11	Absorvência Térmica
P12	Absorvência Solar

A Tabela 5.6 apresenta em resumo a importância dos parâmetros que se definiram como sendo os mais influentes na cobertura assim como a influência que cada um tem nas temperaturas mínimas, médias e máximas para os meses em estudo.

Tabela 5.6 – Influência dos parâmetros nas temperaturas mínimas, médias e máximas.

Parâmetros	Janeiro			Agosto		
	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.
<b>P1</b> Altura das Plantas	✓	+/-	✗	✓	✓	✓
<b>P2</b> Índice de Área Foliar	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>P3</b> Refletividade das Folhas	+/-	+/-	+/-	✓	✓	✓
<b>P7</b> Espessura	✓	✓	+/-	✗	✓	✓
<b>P8</b> Condutibilidade do Solo Seco	✓	✓	✗	✗	✓	✓
<b>P11</b> Absortância Térmica	✓	✓	+/-	✓	✓	✓
<b>P12</b> Absortância Solar	✓	✓	✓	✓	✓	✓

\*Legenda: ✓ muito influente, +/- alguma influência, ✗ nenhuma influência.

#### 5.2.2. SIMULAÇÃO 4 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Como anteriormente já foi referido (§4.2.4) a Simulação 4 apresenta como característica a implementação de uma cobertura jardim sobre a laje de betão e entre elas foi introduzida uma camada de isolamento de poliestireno extrudido de 8 cm.

A Figura 5.2 representa os resultados obtidos através da análise de sensibilidade para os dezasseis parâmetros da Simulação 4.

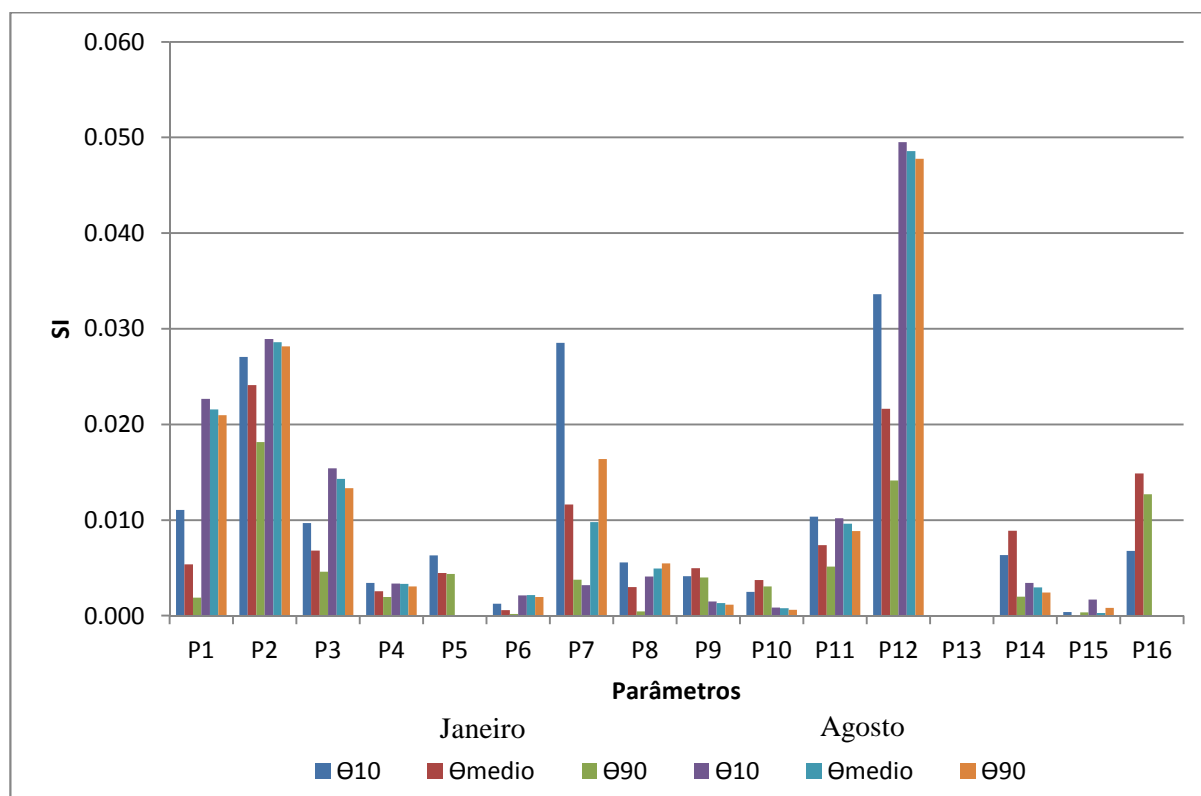


Figura 5.2 – Índice de sensibilidade dos parâmetros da Simulação 4.



Em seguida, será realizada uma observação da influência de cada parâmetro no comportamento da temperatura através dos resultados obtidos. Posteriormente, e como já foi feito anteriormente, será efetuada uma análise conjunta dos parâmetros mais significativos que poderão otimizar o funcionamento da cobertura jardim.

#### 5.2.2.1 Parâmetro 1 – Altura das Plantas

- Através deste parâmetro, no mês de Janeiro, destaca-se apenas uma influência nas temperaturas mínimas;
- O mês de Agosto é onde se verifica uma influência de forma considerável nas temperaturas mínimas, médias e máximas.

#### 5.2.2.2 Parâmetro 2 – Índice de área foliar

- No mês de Janeiro verifica-se que este parâmetro tem muita importância para as temperaturas mínimas, médias e máximas, mas o maior destaque é nas temperaturas mínimas e médias;
- Este parâmetro mostra-se mais influente no mês de Agosto em que se destacam de forma muito significativa e semelhante a influência nas temperaturas mínimas, médias e máximas.

#### 5.2.2.3 Parâmetro 3 – Refletividade da Folha

- Para o mês de Janeiro verifica-se que este parâmetro tem mais influência nas temperaturas mínimas;
- Relativamente ao mês de Agosto há uma influência considerável deste parâmetro nas temperaturas mínimas, médias e máximas.

#### 5.2.2.4 Parâmetro 4 – Emissividade da Folha

- Este parâmetro não tem muita influência nas temperaturas do mês de Janeiro, apenas nas temperaturas mínimas do mês de Janeiro há um pequeno destaque;
- No mês de Agosto destaca-se a influência do parâmetro de forma muito aproximada para as temperaturas mínimas, médias e máximas.

#### 5.2.2.5 Parâmetro 5 – Resistência Estomática Mínima

- O maior destaque verifica-se para os valores mínimos da temperatura no mês de Janeiro;
- Este parâmetro no mês de Agosto não tem influência nas temperaturas.

#### 5.2.2.6 Parâmetro 6 – Rugosidade

- Tem influência insignificante nas temperaturas do mês de Janeiro, destaque apenas para as temperaturas mínimas;
- No mês de Agosto este parâmetro também tem pouca influência contudo a influência é semelhante nas temperaturas mínimas, médias e máximas.

#### 5.2.2.7 Parâmetro 7 – Espessura

- Este parâmetro tem grande influência nas temperaturas mínimas e médias no mês de Janeiro, com maior destaque nas mínimas;
- No mês de Agosto regista-se maior influência nas temperaturas médias e máximas.

#### 5.2.2.8 Parâmetro 8 – Condutibilidade do Solo Seco

- Verifica-se que este parâmetro não tem grande influência no mês de Janeiro mas regista a maior influência nas temperaturas mínimas e médias;
- As temperaturas no mês de Agosto não sofrem grande influência por parte do parâmetro.

#### 5.2.2.9 Parâmetro 9 – Massa Volúmica do Solo Seco

- Não se verifica uma influência significativa deste parâmetro nas temperaturas no mês de Janeiro mas é nas temperaturas médias que há maior destaque;
- No mês de Agosto este parâmetro mostra pouca influência no comportamento das temperaturas.

#### 5.2.2.10 Parâmetro 10 – Calor Específico do Solo Seco

- Não se verifica muita influência do parâmetro nas temperaturas do mês de Janeiro;
- Para o mês de Agosto a influência nas temperaturas é ainda menor.

#### 5.2.2.11 Parâmetro 11 – Absortância Térmica

- Verifica-se que este parâmetro tem maior influência nas temperaturas mínimas no mês de Janeiro;
- No mês de Agosto verifica-se uma influência semelhante para as temperaturas mínimas, médias e máximas.

#### 5.2.2.12 Parâmetro 12 – Absortância Solar

- No mês de Janeiro verifica-se que há uma influência muito significativa nas temperaturas mínimas, médias e máximas, sendo o maior destaque nas mínimas e médias;
- É no mês de Agosto que este parâmetro tem uma influência muito significativa no comportamento das temperaturas mínimas, médias e máximas.

#### 5.2.2.13 Parâmetro 13 – Absortância Visível

- Este parâmetro não foi avaliado.

#### 5.2.2.14 Parâmetro 14 – Teor de Humidade de Saturação Volumétrica da Camada de Solo

- É na temperatura média do mês de Janeiro que este parâmetro regista a sua influência mais significativa;

- No mês de Agosto este parâmetro não regista uma influência significativa das temperaturas.

#### 5.2.2.15 Parâmetro 15 – Teor de Humidade Residual do Volume da Camada de Solo

- Não há influência relativa deste parâmetro no mês de Janeiro;
- Em Agosto este parâmetro também não regista influência significativa no comportamento das temperaturas.

#### 5.2.2.16 Parâmetro 16 – Teor de Humidade Volumétrica Inicial da Camada de Solo

- A influência deste parâmetro verifica-se no comportamento das temperaturas mínima, médias e máximas do mês de Janeiro, sendo a influência mais significativa nas temperaturas médias e máximas;
- No mês de Agosto não há qualquer registo de influência deste parâmetro no comportamento das temperaturas.

Através da análise conjunta efetuada a todos os parâmetros que influenciam o comportamento da cobertura jardim, verifica-se na Figura 5.2 que os parâmetros que maior influência demonstram nas temperaturas mínimas, médias e máximas nos meses de Janeiro e Agosto são, por ordem decrescente de importância os parâmetros 12, 2, 7, 1, 3 e 11 que correspondem respetivamente à absorção solar, ao índice de área foliar, à espessura da camada de solo, à refletividade das plantas e à absorção térmica.

Nas Tabelas 5.7 e 5.8 são apresentados os parâmetros mais significativos para a escolha da vegetação e da camada de solo.

Tabela 5.7 – Parâmetros mais relevantes na escolha da vegetação.

Parâmetros – Vegetação	
P1	Altura das Plantas
P2	Índice de Área Foliar
P3	Refletividade das Folhas

Tabela 5.8 – Parâmetros mais relevantes na escolha do substrato de solo.

Parâmetros – Solo	
P7	Espessura
P11	Absorção Térmica
P12	Absorção Solar

A Tabela 5.9 resume os parâmetros que se definiram como sendo os mais influentes na cobertura assim como a sua influência nas temperaturas mínimas, médias e máximas.

Tabela 5.9 – Influência dos parâmetros nas temperaturas mínimas, médias e máximas.

Parâmetros	Janeiro			Agosto		
	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.
<b>P1</b> Altura das Plantas	✓	+/-	✗	✓	✓	✓
<b>P2</b> Índice de Área Foliar	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>P3</b> Refletividade das Folhas	+/-	+/-	+/-	✓	✓	✓
<b>P7</b> Espessura	✓	✓	+/-	+/-	+/-	✓
<b>P11</b> Absortância Térmica	✓	+/-	+/-	✓	+/-	+/-
<b>P12</b> Absortância Solar	✓	✓	✓	✓	✓	✓

\*Legenda: ✓ muito influente, +/- alguma influência, ✗ nenhuma influência.

### 5.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A análise de sensibilidade permitiu determinar, através dos parâmetros de cálculo das coberturas jardim do programa EnergyPlus, quais os parâmetros que tem mais influência no comportamento higro-térmico de uma habitação.

Na Simulação 3, os parâmetros que de uma forma mais significativa se destacaram foram:

- Altura das plantas;
- Índice de área foliar;
- Refletividade das folhas;
- Espessura do solo;
- Condutibilidade do solo seco;
- Absortância térmica
- Absortância solar.

Já na Simulação 4 os que apresentam destaque mais significativo são:

- Altura das plantas;
- Índice de área foliar;
- Refletividade das folhas;
- Espessura do solo;
- Absortância térmica;
- Absortância solar.

Através das Simulações 3 e 4 verifica-se que existem parâmetros que em ambas as simulações são comuns. Então, e de acordo com os resultados obtidos afirma-se que os parâmetros que tem mais influência nas coberturas jardim são os que correspondem à altura das plantas, ao índice de área foliar, à refletividade das folhas, à espessura do solo, à absortância térmica e à absortância solar.

O parâmetro que não é comum nas duas simulações, respetivamente condutibilidade do solo seco, é justificado pelo facto de na Simulação 3 não se ter utilizado um isolamento a separar o substrato de solo da estrutura de betão, enquanto na Simulação 4 já se introduziu esse isolamento.

Nas figuras 5.1 e 5.2, através das quais é efetuada a análise de sensibilidade, tendo em atenção a escala do índice de sensibilidade, os valores da Simulação 3 são superiores aos da Simulação 4, pode-se assim concluir que a introdução de isolamento, e essa é a prática corrente na implementação de uma cobertura jardim, tem grande influência no comportamento térmico interior podendo induzir o controlo do saldo térmico interior, ou seja, diminuir as oscilações da temperatura no interior do edifício.



# 6

## CONCLUSÕES

### 6.1. CONCLUSÕES GERAIS DO TRABALHO

O trabalho desenvolvido nesta dissertação permitiu cumprir o objetivo principal, análise de sensibilidade dos parâmetros de cálculo das coberturas jardim, assim como os objetivos parciais definidos no Capítulo 1. Neste capítulo serão apresentadas as conclusões retiradas de cada objetivo parcial.

O primeiro objetivo parcial definido consistia na caracterização das coberturas jardim. As principais conclusões retiradas para este objetivo são:

- A cobertura jardim é definida como sendo uma cobertura de um edifício total ou parcialmente coberta por uma camada de vegetação, uma camada de solo e uma membrana de impermeabilização;
- Este tipo de cobertura além de ser implementado em edifícios construídos de raiz, também pode ser implementado em edifícios que já se encontrem construídos;
- As coberturas jardim podem ser de três tipos: extensivas, semi-intensivas e intensivas;
- No caso das coberturas extensivas não é permitida a acessibilidade e o uso da área verde por parte das pessoas. São caracterizadas pelo seu baixo custo de manutenção e relativo baixo custo de execução;
- No caso das coberturas jardim intensivas é permitido o acesso das pessoas e o uso recreativo da área verde. Neste tipo de cobertura já é possível introduzir uma vegetação com um porte significativo, pelo que se torna um sistema mais complexo e com maiores exigências na execução e posterior manutenção;
- As coberturas semi-intensivas são uma conjugação das coberturas extensivas e intensivas;
- De uma forma geral as coberturas jardim oferecem-nos benefícios na área ambiental, económica, de conforto e estética. Alguns dos seus benefícios são traduzidos da seguinte forma: contribuem para um melhor equilíbrio do sistema urbano, melhoram as condições ambientais, criam habitats e promovem a biodiversidade, capacidade de absorção e retenção de águas pluviais minimizando a ocorrência de inundações, reduzem o efeito de ilha de calor das cidades, tem a capacidade de funcionarem como isolamento térmico e acústico melhorando assim a qualidade de vida das pessoas e conseguem prolongar o tempo de vida dos materiais que lhes estão subjacentes protegendo-os dos raios solares;
- Além de benefícios este tipo de coberturas também acarreta algumas desvantagens na sua utilização: transmitem maiores cargas à estrutura do edifício, podendo ser necessário implementar sistemas de irrigação e drenagem que aumentam os consumos de energia, água e materiais, o que pode levar a maiores custos de manutenção dependendo do tipo de cobertura que seja adotado. A curto prazo o custo de execução é elevado só se obtendo rendimento da sua implementação a longo prazo;

- As coberturas jardim são constituídas por uma camada de vegetação, uma camada de solo, uma camada filtrante, uma camada drenante, uma camada de proteção e uma barreira anti-raiz / tela impermeabilizante;
- A camada de vegetação é basicamente o que define este tipo de cobertura, a sua escolha depende dos seguintes fatores: tipo de cobertura, do país, da região e clima, das normas de cada país na seleção de espécies, da inclinação da cobertura, e espessura da camada de solo possível de carregar;
- A camada de solo é de extrema importância porque é a base de crescimento e sustentação das plantas, como tal deve ter em conta os seguintes aspetos: qualidade e quantidade do material orgânico e mineral, da permeabilidade do solo, capacidade de retenção da água (porosidade) e resistência aos agentes erosivos;
- A camada filtrante deve permitir reter as partículas finas e os nutrientes provenientes da camada de solo, os materiais desta camada devem ter as seguintes características: elevada permeabilidade à passagem da água, resistência mecânica e manter as suas propriedades inalteráveis face ao contacto com o solo;
- A camada drenante faz o escoamento da água em excesso para os dispositivos de drenagem instalados na cobertura;
- A camada de proteção faz a proteção da tela anti-raiz e da tela impermeabilizante às ações mecânicas na fase de construção da cobertura;
- A barreira anti-raiz e a tela impermeabilizante protegem a estrutura do edifício da ação mecânica das raízes e das infiltrações de água pelo que o seu correto funcionamento é essencial;
- Atualmente já é dada uma maior importância às coberturas jardim, os estudos realizados comprovam essa situação, prova é que alguns países, como é o caso de Portugal, já adotam este sistema construtivo em muitas das suas grandes obras.

Através da aplicação do programa EnergyPlus à simulação higratérmica de uma cobertura jardim retiraram-se as seguintes conclusões:

- O utilizador pode definir o modelo de cobertura jardim como sendo a camada exterior da cobertura de um edifício;
- O modelo conta com as trocas radiativas, onda curta e onda longa, dentro da copa das plantas, com os efeitos de convecção de calor na copa das plantas, com os fenómenos de evapotranspiração do solo e das plantas e com a condução de calor na camada de solo;
- O balanço energético da cobertura jardim é dominado pela radiação solar, em que esta é equilibrada pelo fluxo de calor sensível (convecção) e latente (evaporação) proveniente do solo e das superfícies foliares combinada com a condução de calor para dentro do solo;
- O balanço energético é subdividido num balanço para a camada de folhagem ( $F_f$ ) e num balanço para a camada de solo ( $F_g$ ) que dá origem a duas equações;
- Os fluxos de calor sensível são traduzidos por duas equações: uma para a camada de folhagem ( $H_f$ ) e uma para a camada de solo ( $H_g$ ). Este fluxo de calor sensível consiste na troca de calor sempre que há variação de temperatura entre duas zonas;
- Os fluxos de calor latente são traduzidos por duas equações: uma para a camada de folhagem ( $L_f$ ) e uma para a camada de solo ( $L_g$ ). O fluxo de calor latente consiste numa transferência de calor que origina a mudança do estado físico de uma substância através do fornecimento de energia;



- O modelo de cobertura jardim no programa EnergyPlus tem em conta dezasseis parâmetros sendo que 5 correspondem a características das plantas e os restantes 11 a características do solo;
- Dos dezasseis parâmetros que o utilizador tem de preencher 8 são de preenchimento obrigatório. Para as plantas os parâmetros obrigatórios são: Índice de área foliar, refletividade da folha e emissividade da folha. Para o solo os parâmetros obrigatórios são: rugosidade, espessura, condutibilidade do solo seco, massa volúmica do solo seco e o calor específico do solo seco;

As principais conclusões na análise de sensibilidade dos parâmetros de cálculo das coberturas jardim são:

- Com os resultados obtidos verificou-se que as coberturas jardim nos meses em que a temperatura exterior atinge valores baixos, inverno, tem um efeito benéfico porque regulam a temperatura interior do edifício promovendo o acréscimo da temperatura interior. No caso de as temperaturas exteriores serem elevadas, verão, o efeito das coberturas jardim regulam a temperatura interior do edifício promovendo um decréscimo térmico interior;
- A Simulação 3, cobertura jardim sem isolamento, apresenta maiores flutuações de temperatura do que a Simulação 4, cobertura jardim com isolamento;
- As coberturas jardim já por si apresentam vantagens de carácter térmico e energético, se acrescentarmos ainda uma camada de isolamento consegue-se controlar o fluxo térmico, reduzindo os saldos térmicos entre o interior e o exterior dos edifícios, diminuindo as flutuações de temperatura interior e aumentando assim a sua performance e conforto térmico;
- Os saldos de temperatura para a Simulação 3 foram da ordem dos 1,2°C e 0,8°C para os meses de Janeiro e Agosto respetivamente, já no caso da Simulação 4 os saldos térmicos são mais significativos;
- Através da análise de sensibilidade dos parâmetros das coberturas jardim, verificou-se que cada parâmetro tem influência relativa no que diz respeito às temperaturas mínimas, médias e máximas;
- Os parâmetros mais importantes e que contribuem significativamente para melhorar os efeitos das coberturas jardim na temperatura interior dos edifícios são: a altura das plantas, o índice de área foliar, a refletividade das folhas, a espessura do solo, a absorvância térmica e a absorvância solar.

## **6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Na sequência do trabalho realizado, seria interessante desenvolver outros tópicos, tais como:

- Através do modelo cobertura jardim introduzir um sistema de irrigação no programa EnergyPlus e verificar como este sistema pode contribuir para o comportamento higrotérmico dos edifícios;
- Otimizar o modelo simulado de cobertura jardim, coordenando os valores dos parâmetros, plantas e solo, com a localização geográfica e clima da região, estudo de caso;
- Utilizar a análise de sensibilidade dos parâmetros de forma a dimensionar a implementação de uma cobertura jardim;
- Criar uma base de modelos base de cobertura jardim a aplicar coordenada com as diferentes características, de biodiversidade, de cada região;

- Condicionar o substrato de solo da cobertura jardim à capacidade retenção de água das chuvas, com a possibilidade de posterior reutilização, minimizando o efeito negativo das escorrências.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Palha, P. *Revista da Associação Portuguesa de Horticultura* nº 106, 2011.
- [2] Varela, A. *A Utilização de Revestimentos de Vegetação Intensivos e Extensivos em Projecto de Arquitectura Paisagista em Cobertura*. Dissertação de Mestrado em Arquitectura Paisagista, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, 2011.
- [3] <http://www.adororoma.com/roma-fotos-de-roma.html> 09/11/2012
- [4] Vieira, Siza A. Álvaro Siza Vieira “O Sentido das Coisas”, *Revista El Croquis* nº 140, Espanha, Madrid, 2008.
- [5] <http://www.questoesdeconcursos.com.br> 19/11/2012
- [6] <http://www.scbraga.pt/estadio> 19/11/2012
- [7] <http://www.bing.com/maps> 05/12/2012
- [8] Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., Davison, J.B. *Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit*, *Energy and Buildings* 42 (2010) 1582-1591.
- [9] IGRA, Internacional Green Roof Association (<http://www.igra-world.com>)
- [10] <http://www.teknosel.com> 15/11/2012
- [11] Caudrey, D. *Green Roof Systems Acknowledging the Potential*, As Part of the Examination for the degree of Bachelor of Science with Honours in Architecture, Scott Sutherland School, Faculty of Design, The Robert Gordon University, 2005.
- [12] <http://modernarchitecturecenter.com/13/11/2011/green-roof-house-architecture-by-guz-architect> 12/11/2012
- [13] <http://beautiful-houses1.blogspot.pt/2011/03/luxury-sustainable-green-roof-house.html> 12/11/2012
- [14] Ayata, T., Velasco, P., Srebric, J. *An investigation of sensible heat fluxes at a green roof in laboratory Setup*, *Building and Environmental* 46 (2011) 1851-1861.
- [15] Jaffal, I., Ouldboukhitine, S., Belarbi, R. *A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance*, *Renewable Energy* 43 (2012) 157-164.
- [16] [http://www.designmeans.com/work/illustration/green\\_roof.html](http://www.designmeans.com/work/illustration/green_roof.html) 12/11/2012
- [17] Borga, P. *Análise Exigencial dos Green Roofs – Estudo de Casos*, Dissertação de Mestrado Engenharia Civil – Especialização em Construções, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [18] Lopes, J. *As Especificidades das Coberturas Ajardinadas*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2004
- [19] <http://www.coletivoverde.com.br/telhado-ecologico/> 20/11/2012
- [20] <http://floresdoareal.blogspot.pt/2011/05/anagallis-arvensis-l.html> 20/11/2012
- [21] <http://dotecome.blogspot.pt/2012/05/relvado.html> 21/12/2012
- [22] <http://atelier-jardinagem.blogspot.pt/> 21/11/2012
- [23] <http://www.siro.pt/p.artigo.g/artid/1143> 21/11/2012

- [24] <http://www.officinemaccaferri.com/products/geosynthetics/drainage-geocomposites/13292-2.html> 21/11/2012
- [25] [http://www.nophadrain.nl/EN/groene\\_daken\\_producten.html](http://www.nophadrain.nl/EN/groene_daken_producten.html) 21/11/2012
- [26] <http://superinertes.pt/> 21/11/2012
- [27] <http://www.hartseal.co.uk/2010/06/epdm-vs-grp-roofing/> 21/11/2012
- [28] <http://portuguese.alibaba.com> 21/11/2012
- [29] <http://www.sotecnisol.pt/materiais/produtos/solucoes-de-impermeabilizacao-isolamentos-e-drenagens/impermeabilizacoes/telas-betuminosas/ecoplas-py-40-t/ecoplas-py-40t/> 21/11/2012
- [30] <http://buildingmaterials.cetco.com/> 09/01/2013
- [31] Gomes, K. *Validação da Modelação de um Edifício de Habitação com o Programa EnergyPlus por Comparação com Medições “In Situ”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Construções, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [32] EnergyPlus, *Getting Started with EnergyPlus* in EnergyPlus Documentation Menu. Outubro, 2011.
- [33] Machado, M. *Influência de Regimes Variáveis de Ventilação e Aquecimento no Comportamento Higrotérmico de Edifícios de Habitação Social*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Construções, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [34] Sailor, D.J. *A green roof model for building energy simulation programs*, Energy and Buildings 40 (2008) 1466-1478.
- [35] Costa, H. *Influência do Regime de Ventilação no Comportamento Higrotérmico de Habitações sem Aquecimento Contínuo*, Dissertação de Mestrado Engenharia Civil – Especialização em Construções, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [36] EnergyPlus, *Engineering References* in EnergyPlus Documentation Menu, Outubro, 2011.
- [37] Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., Mihalakakou, G. *Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance*, Energy and Buildings 33 (2001) 719-729.
- [38] Oke, T.R. *Boundary Layer Climates*. Methuen, London, 1978, ISBN 0-416-04422-0.
- [39] Kabenge, I. *Stomatal and Canopy Resistance, Plant Physiological Parameters, Evapotranspiration and other Surface Energy Fluxes of Phragmites-dominated Riparian Plant Community in the Platte River Basin, Nebraska, USA*, April 2011.
- [40] Davenport, J.R., Perry, E.M., Lang, N.S., Stevens, R.G. *Leaf Reflectance for Nondestructive of Measurement of Plant Nutrient Status*, HorTechnology, January – March 200.
- [41] PP Systems *Measurement of Leaf/Canopy Level Reflectance with The UniSpec-SC*, Setembro 2005.
- [42] Slaton, Michele R., Hunt, E. Raymond, Smith, William K. *Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics*, American Journal of Botany 88(2): 278-284, 2001.
- [43] López, A., Molina-Aiz, F.D., Valera, D.L, Peña, A. *Determining the emissivity of leaves of nine horticultural crops by means of infrared thermography*, Scientia Horticulturae 137 (2012) 49-58.

- [44] Anda, A., Loke, Z. *Stomatal resistance investigations in maize*, Prpceedings of the 7<sup>th</sup> Hungarian Congress on Plant Physiology, 2002.
- [45] Carneiro, R. *Modelagem da Resistência Estomática da Eficiência do Uso da Água em Plantios Jovens de Eucalipto Irrigados e Não Irrigados na Região da Bacia do Rio Doce*, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil, 2004.
- [46] Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE), Decreto de lei nº 79-2006, Diário da Republica 1<sup>o</sup>série – A, 4 de Abril 2006.
- [47] Santamouris, M., Sfakianaki, A, Pagalou, E., Pavlou, K., Assimakopoulos, M. *Theoretical and experimental analysis of the termal behaviour of a green roof system installed in two residential build-ings in Athens, Greece*, Internacional Journal of Energy Research 33:1059-1069, April 2009.
- [48] Santamouris, M., Pavlou, C., Doukas, P., Mihalakakou, G., Synnefa, A., Hatzibiros, A., Patargias, P. *Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece*, Energy 32 (2007) 1781-1788.
- [49] Pallin, S. *Probabilistic Risk Assessment of Energy Efficient Retrofitting Techniques – Focus on Multi-family Dwellings and the Effects of Changing Air Movements*, Thesis for the licentiate of Engi-neering. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2012.